

# TABLE DES MATIÈRES

Abréviations: SC: Sujet connexe C: Complément

## AVANT-PROPOS

VII

## PROLOGUE

Le grand tour.....	2
Fenêtre 1: $10^{-14}$ m, le noyau atomique .....	2
Fenêtre 2: $10^{-10}$ m, l'atome .....	4
Fenêtre 3: $10^{-1}$ m, l'échelle humaine.....	5
Fenêtre 4: $10^8$ m, la planète Terre .....	6
Fenêtre 5: $10^9$ m, le système Terre-Lune.....	6
Fenêtre 6: $10^{13}$ m, le système solaire.....	7
Fenêtre 7: $10^{17}$ m, le Soleil et Alpha du Centaure.....	9
Fenêtre 8: $10^{21}$ m, la Voie lactée.....	9
Fenêtre 9: $10^{25}$ m, amas de galaxies et vides .....	10
<b>Termes importants</b> .....	12
<b>Questions de révision</b> .....	12

## CHAPITRE 0

L'astronomie à l'œil nu.....	13
<i>Les enfants du soleil</i> .....	13
0.1 Les constellations.....	14
Les noms des étoiles .....	16
Le système des magnitudes.....	16
0.2 La rotation de la sphère céleste .....	16
L'étoile Polaire.....	17
Les étoiles circumpolaires et les étoiles invisibles.....	18
0.3 Le mouvement annuel du Soleil.....	20
0.4 Les saisons .....	21
Le point de vue géocentrique.....	21
Le point de vue héliocentrique .....	23
0.5 Les phases de la Lune.....	24
0.6 La durée du jour et du mois .....	26
La rotation de la Terre.....	26
La révolution de la Lune.....	27
0.7 Les éclipses de Lune et de Soleil .....	28
0.8 La précession des équinoxes .....	30
0.9 Le calendrier.....	31
0.10 Autres objets célestes visibles à l'œil nu .....	33
La Voie lactée.....	33
Les nébuleuses .....	33
Les comètes.....	33
Les astres errants.....	34

SC	L'indice UV.....	35
C0.1	L'altitude de l'étoile Polaire.....	38
C0.2	Les étoiles circumpolaires.....	38
C0.3	L'altitude du Soleil.....	39
C0.4	L'horloge sidérale.....	39
C0.5	La durée d'une éclipse totale de Soleil.....	44
C0.6	La prédiction des éclipses de Soleil.....	44
	<b>Termes importants</b> .....	47
	<b>Questions de révision</b> .....	47
	<b>Problèmes</b> .....	48

## PREMIÈRE PARTIE

	<i>La perspective cosmique</i> .....	51
--	--------------------------------------	----

### CHAPITRE 1

	<b>Le système du monde</b> .....	54
1.1	L'invention de l'astrologie.....	54
1.2	Les observations mésopotamiennes.....	56
	Les caractéristiques du mouvement des astres errants.....	57
1.3	Un Univers géocentrique.....	57
	La perfection du cercle.....	58
1.4	Le système de Ptolémée.....	59
	Des liens inexplicables.....	60
1.5	Le système de Copernic.....	62
	Un premier argument de concordance: l'ordre des planètes.....	63
	Un argument de simplicité: l'explication de la rétrogradation des planètes.....	64
	Un deuxième argument de concordance: la taille relative des rétrogradations.....	65
	Le problème de la préférence zodiacale.....	65
1.6	Les observations de Galilée.....	66
1.7	Un accueil mitigé.....	67
SC	Une critique de l'astrologie.....	69
C1.1	Période sidérale et période synodique.....	72
	<b>Termes importants</b> .....	74
	<b>Questions de révision</b> .....	74
	<b>Problèmes</b> .....	75

### CHAPITRE 2

	<b>La profondeur du ciel</b> .....	76
2.1	Un soleil lointain.....	77
	La méthode d'Aristarque.....	77
2.2	La taille de la Terre.....	79
2.3	La distance de la Terre à la Lune.....	80
2.4	L'échelle du système de Ptolémée.....	80
2.5	L'échelle du système de Copernic.....	81
	La distance des planètes inférieures.....	81
	La distance des planètes supérieures.....	82
	La sphère des étoiles éclatées.....	83

2.6	La détermination de l'unité astronomique .....	84
2.7	La parallaxe des étoiles.....	85
	La relation parallaxe-distance.....	85
2.8	La relation intensité-luminosité-distance .....	87
2.9	La luminosité des étoiles .....	88
	La méthode des étoiles jumelles .....	88
	Les céphéides .....	90
2.10	L'étendue de la Voie lactée .....	91
2.11	Des nébuleuses jusqu'aux confins de l'Univers observable .....	95
	Les étalons de distance .....	96
C2.1	Distance Terre-Lune : la méthode d'Hipparque .....	99
C2.2	Distance d'une planète supérieure : la méthode de Copernic.....	100
C2.3	La relation intensité-luminosité-distance .....	101
	<b>Termes importants</b> .....	102
	<b>Questions de révision</b> .....	102
	<b>Problèmes</b> .....	103

## DEUXIÈME PARTIE

<i>Sur la Terre comme au ciel</i> .....	105
---	-----

### CHAPITRE 3

<b>La gravitation</b> .....	108
-----------------------------	-----

3.1	Les observations de Tycho Brahé.....	108
3.2	Les lois de Kepler.....	109
	Première loi de Kepler .....	110
	Deuxième loi de Kepler .....	111
3.3	La physique des orbites .....	112
3.4	La gravitation universelle .....	114
	La légende de la pomme de Newton... ..	114
	... et la réalité historique.....	115
	L'apesanteur en orbite.....	116
3.5	La masse des objets célestes .....	116
3.6	Le triomphe de Newton.....	118
3.7	L'origine de la théorie de la relativité .....	119
	Le mur de la lumière .....	122
	La relation masse-énergie .....	123
3.8	La relativité générale.....	123
	Le principe d'équivalence .....	124
	La courbure de l'espace-temps.....	125
	Les lentilles gravitationnelles.....	126
3.9	Le ralentissement du temps gravitationnel.....	127
C3.1	La vitesse d'une planète à l'aphélie et au périhélie .....	129
C3.2	De la troisième loi de Kepler à la force en $1/r^2$ .....	131
C3.3	La chute de la Lune .....	132
C3.4	La loi de la gravitation universelle .....	133
C3.5	La troisième loi de Kepler généralisée.....	133
C3.6	Ralentissement du temps et contraction des longueurs en relativité restreinte.....	134
C3.7	Champ gravitationnel, vitesse minimale de mise en orbite et vitesse de libération.....	136

<b>Termes importants</b> .....	139
<b>Questions de révision</b> .....	139
<b>Problèmes</b> .....	140

## CHAPITRE 4

<b>Les codes de la lumière</b> .....	143
4.1 La nature de la lumière .....	143
4.2 Le spectre électromagnétique .....	144
La spectroscopie .....	147
4.3 Lumière et température .....	147
Le spectre du corps noir .....	148
La luminosité du corps noir .....	149
4.4 Le photon et l'atome .....	152
Le spectre de l'hydrogène .....	153
4.5 Les principaux types de spectres .....	153
Le spectre d'émission .....	154
Le spectre thermalisé .....	154
Le spectre d'absorption .....	155
Les autres spectres .....	157
4.6 Opacité et ionisation .....	157
4.7 Le décalage de la longueur d'onde .....	159
L'effet Doppler .....	159
L'effet Doppler relativiste .....	161
Le décalage vers le rouge gravitationnel .....	162
Le décalage vers le rouge cosmologique .....	162
Le paramètre $z$ .....	163
4.8 D'autres codes .....	163
La taille maximale d'une source lumineuse variable .....	163
La mesure du champ magnétique .....	164
La polarisation de la lumière .....	165
C4.1 Les magnitudes .....	166
La magnitude apparente .....	166
La magnitude absolue et le module de distance .....	167
La conversion des magnitudes .....	168
La correction bolométrique .....	169
C4.2 Le rapport $I_b/I_v$ et la température des étoiles .....	170
L'indice $B - V$ .....	172
C4.3 Le rayonnement synchrotron .....	172
C4.4 L'effet Doppler classique .....	173
<b>Termes importants</b> .....	175
<b>Questions de révision</b> .....	175
<b>Problèmes</b> .....	177

## CHAPITRE 5

<b>Les yeux artificiels</b> .....	179
5.1 Le pouvoir de captation .....	179
5.2 La limite de résolution .....	180
L'optique adaptative .....	182
Limite de résolution et longueur d'onde .....	182
L'interférométrie .....	183
5.3 Le facteur de grossissement .....	184
5.4 Enregistrer la lumière .....	187

5.5	L'observation en lumière visible.....	188
	Le télescope spatial Hubble.....	191
SC	L'évolution du télescope.....	192
5.6	Les fenêtres de l'atmosphère.....	198
5.7	L'observation en lumière à basse énergie.....	198
	De l'infrarouge aux micro-ondes.....	198
	Les ondes radio.....	200
	L'astronomie radar.....	202
5.8	L'observation en lumière à haute énergie.....	202
SC	La nature de la science et de la technologie.....	205
C5.1	Le grossissement d'un télescope.....	209
	<b>Termes importants</b> .....	211
	<b>Questions de révision</b> .....	211
	<b>Problèmes</b> .....	213



## TROISIÈME PARTIE

<i>Le grand jeu des étoiles</i> .....	215
---------------------------------------	-----

### CHAPITRE 6

<b>Les caractéristiques des étoiles</b> .....	218
---	-----

6.1	Le paradoxe de l'âge du Soleil.....	218
6.2	L'énergie nucléaire.....	220
	La fusion et la fission.....	221
	Le modèle du volcan.....	222
6.3	La durée de vie du Soleil.....	224
6.4	La nucléosynthèse stellaire.....	226
	La transmutation des noyaux.....	227
	La chaîne proton-proton ( $T > 10\,000\,000\text{ K}$ ).....	227
	Le cycle CNO ( $T > 15\,000\,000\text{ K}$ ).....	228
	Le processus triple alpha ( $T > 100\,000\,000\text{ K}$ ).....	229
	La fusion carbone-carbone ( $T > 600\,000\,000\text{ K}$ ).....	230
	La fusion oxygène-oxygène ( $T > 1\,500\,000\,000\text{ K}$ ).....	230
	La fusion du silicium ( $T > 3\,000\,000\,000\text{ K}$ ).....	231
	La formation des autres éléments.....	231
6.5	La structure interne des étoiles.....	231
	La «soupape de sûreté» des étoiles.....	232
	Le transport de l'énergie.....	233
	Sonder l'intérieur du Soleil.....	234
6.6	La surface des étoiles.....	236
	Les taches.....	237
	Les zones actives.....	238
	L'atmosphère.....	239
6.7	La classification des étoiles.....	240
	Comment placer une étoile sur l'axe de température?.....	241
	Comment placer une étoile sur l'axe de luminosité?.....	243
6.8	Le Soleil en perspective.....	244
	Le rayon des étoiles.....	245
6.9	La masse des étoiles.....	246
	La troisième loi de Kepler appliquée aux systèmes d'étoiles doubles.....	247

6.10	L'interprétation du diagramme HR .....	248
C6.1	Profondeur relative des raies spectrales et température .....	251
C6.2	La masse des étoiles .....	253
C6.3	Les binaires spectroscopiques .....	254
	<b>Termes importants</b> .....	258
	<b>Questions de révision</b> .....	258
	<b>Problèmes</b> .....	261

## CHAPITRE 7

	<b>Vie et mort des étoiles</b> .....	262
7.1	La matière interstellaire.....	262
	Les grains de poussière interstellaire .....	262
	Le gaz interstellaire.....	263
	Les régions HII.....	264
	Les régions HI.....	265
	Les nuages moléculaires.....	265
	La couleur des nébuleuses .....	266
7.2	Une étoile est née.....	267
	Les détails de l'effondrement .....	269
7.3	La vie dans la série principale .....	270
7.4	L'évolution post-série principale des étoiles de faible masse .....	273
	La phase géante rouge.....	274
	Le flash de l'hélium et la phase sous-géante.....	275
	La phase supergéante rouge et les nébuleuses planétaires.....	276
	La phase naine blanche .....	276
	Les étoiles sous-naines.....	279
7.5	L'évolution post-série principale des étoiles massives .....	280
	La catastrophe du fer.....	281
	Les supernovæ.....	281
	Les étoiles Wolf-Rayet.....	284
	L'énigmatique Eta de la Carène .....	285
	L'âge des amas d'étoiles .....	285
7.6	L'évolution des étoiles doubles.....	287
	Les novæ .....	289
	Les supernovæ de type Ia .....	290
7.7	Les étoiles à neutrons .....	291
	Étoiles à neutrons et transfert de masse.....	293
	Les pulsars binaires et les sursauts gamma .....	293
7.8	Les trous noirs.....	295
	La détection des trous noirs .....	297
	Une mission vers un trou noir.....	298
SC	La vie du Soleil .....	301
C7.1	Les régions HII.....	304
	De l'ultraviolet au visible .....	304
	Les raies interdites .....	304
C7.2	La structure hyperfine de l'hydrogène .....	305
C7.3	La dégénérescence et les étoiles.....	306
C7.4	Les étoiles variables.....	308
C7.5	Lobes de Roche et points de Lagrange.....	309
C7.6	L'effet de marée .....	314
	<b>Termes importants</b> .....	315
	<b>Questions de révision</b> .....	315
	<b>Problèmes</b> .....	317

**Les environnements galactiques** ..... 319

8.1 L'anatomie de la Voie lactée ..... 319

    L'origine des bras spiraux ..... 321

    Les populations d'étoiles ..... 324

    Un scénario de la formation de la Voie lactée ..... 326

    La masse de la Voie lactée ..... 328

    Un voyage au centre de la Voie lactée ..... 329

8.2 Les voisines de la Voie lactée ..... 331

8.3 La classification des galaxies ..... 335

    Les propriétés distinctives ..... 336

8.4 Galaxies en interaction ..... 338

8.5 Les galaxies actives ..... 342

8.6 La loi de Hubble ..... 345

8.7 La superstructure de l'Univers ..... 347

8.8 L'Univers invisible ..... 350

C8.1 Les galaxies actives ..... 354

    Les galaxies Seyfert 1 et 2 ..... 354

    Les radiogalaxies ..... 354

    Les quasars et les QSO ..... 354

    Les blazars ..... 354

    Contraintes physiques ..... 355

    Une interprétation globale plausible ..... 356

C8.2 La masse de la matière invisible ..... 357

    1. La distribution de la lumière et de la matière ..... 357

    2. La courbe de rotation du disque ..... 358

    3. La nécessité de la matière invisible ..... 359

    4. Le calcul de la masse invisible ..... 360

**Termes importants** ..... 363

**Questions de révision** ..... 363

**Problèmes** ..... 365



**QUATRIÈME PARTIE**

***Un cosmos en évolution*** ..... 367

**La théorie du Big Bang** ..... 370

9.1 Un Univers fini ou infini ? ..... 370

    Le paradoxe d'Olbers ..... 371

9.2 Einstein et la constante cosmologique ..... 372

9.3 L'expansion de l'espace ..... 373

    L'origine de la loi de Hubble ..... 375

    Le paramètre de Hubble et l'âge de l'Univers ..... 376

9.4 Le décalage vers le rouge cosmologique ..... 377

9.5 Big Bang ! ..... 379

    Avant le Big Bang ..... 380

9.6 Le rayonnement de fond cosmologique ..... 381

9.7 La nucléosynthèse primordiale ..... 384

Étape 1: Création de la matière ( $t = 10^{-32}$ s; $T = 10^{26}$ K; $\rho = 10^{73}$ kg/m <sup>3</sup> ) .....	384
Étape 2: Formation des protons et des neutrons ( $t = 0,0001$ s; $T = 10^{12}$ K; $\rho = 10^{17}$ kg/m <sup>3</sup> ) .....	385
Étape 3: Les neutrons commencent à déperir ( $t = 0,01$ s; $T = 10^{11}$ K; $\rho = 10^{13}$ kg/m <sup>3</sup> ) .....	385
Étape 4: L'hélium est inaccessible ( $t = 1$ s; $T = 10^{10}$ K; $\rho = 10^9$ kg/m <sup>3</sup> ) .....	385
Étape 5: Le deutérium devient stable: les neutrons sont sauvés ( $t = 100$ s; $T = 10^9$ K; $\rho = 10^5$ kg/m <sup>3</sup> ) .....	386
Étape 6: L'hélium reste coincé: les noyaux lourds devront attendre ( $t = 12$ jours; $T = 10^7$ K; $\rho = 0,001$ kg/m <sup>3</sup> ) .....	386
Nucléosynthèse primordiale et matière invisible .....	387
9.8 L'émergence de la structure .....	388
SC La victoire du Big Bang .....	390
<b>Termes importants</b> .....	393
<b>Questions de révision</b> .....	393
<b>Problèmes</b> .....	394

## CHAPITRE 10

Les modèles d'Univers .....	395
10.1 Les paramètres des modèles d'Univers .....	395
Le paramètre de Hubble et la masse volumique de la matière .....	395
La masse volumique du vide .....	396
La courbure globale de l'espace .....	396
Les relations entre les paramètres .....	398
Le modèle original d'Einstein .....	399
10.2 Les modèles de Friedmann et d'Einstein-de Sitter .....	399
Le destin de l'Univers .....	401
10.3 L'expansion de l'espace dans l'Univers d'Einstein-de Sitter .....	402
La distance des sources de lumière dans l'Univers d'Einstein-de Sitter .....	405
10.4 Le nouveau modèle standard .....	409
L'évolution du facteur d'échelle dans le nouveau modèle standard .....	412
C10.1 Dérivation newtonienne de la relation entre $H$ et $\rho_m$ dans l'Univers d'Einstein-de Sitter .....	416
C10.2 L'âge de l'Univers dans le modèle d'Einstein-de Sitter .....	417
C10.3 Distance d'une source de lumière dans l'Univers d'Einstein-de Sitter .....	417
C10.4 Le trajet des photons du rayonnement de fond cosmologique dans le modèle d'Einstein-de Sitter .....	418
C10.5 Comparaison des distances et des intensités des objets lointains dans le modèle d'Einstein-de Sitter et dans le nouveau modèle standard .....	420
C10.6 L'évolution du facteur d'échelle dans les premiers instants de l'Univers .....	421
<b>Termes importants</b> .....	428
<b>Questions de révision</b> .....	428
<b>Problèmes</b> .....	429





*La nouvelle frontière* ..... 431

**CHAPITRE 11**

**Le système Terre-Lune** ..... 434

- 11.1 La constitution interne de la Terre ..... 434
  - Taille, masse et densité..... 434
  - Les matériaux de base ..... 436
  - Une hiérarchie de densités..... 437
  - Sonder le centre de la Terre ..... 437
  - La chaleur interne ..... 438
- 11.2 L'horloge radioactive et l'âge de la Terre ..... 439
  - L'âge de la Terre ..... 441
- 11.3 Le magnétisme terrestre ..... 442
- 11.4 La dérive des continents ..... 443
  - Les points chauds ..... 445
- 11.5 L'atmosphère de la Terre ..... 445
  - La structure verticale de l'atmosphère..... 446
- 11.6 La température de la Terre ..... 447
  - L'effet de serre..... 448
- 11.7 L'atmosphère fuit-elle?..... 448
- 11.8 L'anatomie de la Lune ..... 450
  - L'évolution de la surface lunaire..... 452
  - Les montagnes lunaires ..... 454
  - De l'eau sur la Lune ?..... 454
- 11.9 Les marées ..... 455
- C11.1 La température d'équilibre d'une planète ..... 458
- C11.2 L'effet de marée ..... 459
  - L'origine des deux renflements de marée..... 459
  - Calcul de l'effet de marée..... 459
- Termes importants** ..... 461
- Questions de révision** ..... 461
- Problèmes**..... 463

**CHAPITRE 12**

**Une croisière interplanétaire — Première partie** ..... 464

- 12.1 Un inventaire du système solaire ..... 464
- 12.2 L'exploration du système solaire ..... 465
- 12.3 Mercure: le paradis du bronzage..... 467
- 12.4 Vénus: l'enfer voilé ..... 471
  - L'atmosphère de Vénus ..... 472
  - La surface de Vénus..... 473
  - L'évolution de la croûte de Vénus..... 473
  - La rotation rétrograde de Vénus ..... 475
- 12.5 La Terre et la Lune..... 476
- 12.6 Mars: la planète rouillée..... 478
  - Histoires de martiens ..... 479
  - La topographie de Mars..... 480
  - Les réserves de glace ..... 484
  - Un passé plus clément ..... 485
  - L'analyse du sol de Mars et la recherche de la vie ..... 486
  - Les satellites de Mars..... 489

12.7	Les astéroïdes .....	490
	La distribution des astéroïdes dans la ceinture principale.....	492
C12.1	En voyage dans le système solaire.....	494
	Le chemin le plus économique.....	494
	Les fenêtres de lancement.....	495
C12.2	L'orbite d'une sonde: notions avancées .....	496
C12.3	L'effet catapulte .....	498
	<b>Termes importants</b> .....	502
	<b>Questions de révision</b> .....	502
	<b>Problèmes</b> .....	503

## CHAPITRE 13

<b>Une croisière interplanétaire – Deuxième partie</b> .....		504
13.1	Jupiter: une étoile ratée.....	505
	L'atmosphère de Jupiter .....	506
	Voyage au centre de Jupiter .....	507
13.2	Les satellites Galiléens.....	509
	Io: la pizza surgelée .....	509
	Europe: la boule de billard craquelée .....	513
	Ganymède: une bouteille au congélateur.....	516
	Callisto: la lune de glace .....	517
13.3	Saturne: le seigneur des anneaux.....	519
	Titan: le royaume du méthane .....	523
13.4	Uranus: la planète couchée.....	524
13.5	Neptune: la dernière géante.....	527
	Triton: une calotte polaire en ébullition .....	529
13.6	Pluton: la planète double .....	531
13.7	Les anneaux planétaires.....	533
	La limite de Roche.....	533
	La nature et l'origine des anneaux .....	534
	L'anneau de Jupiter.....	535
	Les anneaux de Saturne .....	535
	Les anneaux d'Uranus et de Neptune.....	536
13.8	Le bestiaire des petits mondes.....	537
	Les mondes intermédiaires: entre 1000 et 2000 km.....	537
	Astéroïdes et satellites de taille comprise entre 250 et 1000 km....	538
13.9	Les comètes .....	539
	Le noyau de la comète de Halley.....	540
	La queue des comètes.....	541
	Origine et destin des comètes.....	541
	Les étoiles filantes .....	542
13.10	Lorsque le ciel nous tombe sur la tête... ..	543
	Le danger des météorites .....	544
C13.1	La limite de Roche.....	548
C13.2	Limite de hauteur des montagnes et sphéricité des objets planétaires.....	548
	<b>Termes importants</b> .....	550
	<b>Questions de révision</b> .....	550
	<b>Problèmes</b> .....	552

## CHAPITRE 14

<b>La planétologie</b> .....	553
14.1 La classification des planètes.....	553
La différenciation des intérieurs planétaires.....	554
14.2 La planétologie comparée.....	555
Une question d'atmosphère.....	555
La comparaison des croûtes.....	557
14.3 L'origine du système solaire.....	559
Les météorites et l'âge du système solaire.....	559
La formation des planètes.....	560
L'origine de la rotation des planètes.....	561
14.4 Les exoplanètes.....	562
Les Jupiters chauds.....	564
Les planètes excentriques.....	566
C14.1 L'atmosphère des planètes telluriques.....	567
SC Les anomalies du système solaire.....	568
<b>Termes importants</b> .....	572
<b>Questions de révision</b> .....	572

## ÉPILOGUE

<b>Le cosmos et la vie</b> .....	574
La vie sur Terre.....	574
Les grandes étapes de la vie sur Terre.....	575
Les environnements propices à la vie.....	576
L'hypothèse « optimiste » : une communauté galactique d'êtres intelligents....	578
L'hypothèse « pessimiste » : sommes-nous seuls?.....	581
<b>Termes importants</b> .....	584
<b>Questions de révision</b> .....	584

## ANNEXES

I La notation scientifique.....	585
II Unités et facteurs de conversion.....	585
III L'alphabet grec.....	588
IV Latitude et longitude.....	589
V Géométrie élémentaire.....	589
VI Les 25 étoiles les plus brillantes dans le ciel de la Terre.....	591
VII Les 25 étoiles les plus proches de la Terre.....	592
VIII Le Soleil et les 16 objets planétaires principaux du système solaire....	593
IX Constantes universelles.....	593
X Le ciel ce soir.....	594
XI Les isotopes principaux de chaque élément chimique.....	596

<b>RÉPONSES AUX PROBLÈMES</b> .....	597
-------------------------------------	-----

<b>SOURCES DES PHOTOGRAPHIES</b> .....	601
--	-----

<b>INDEX</b> .....	605
--------------------	-----