

## T A B L E D E S M A T I E R E S

	<b>Introduction</b> .....	1
<b>CHAPITRE I.</b>	<b>La Mécanique newtonienne</b> .....	5
§ 1	Les référentiels galiléens.....	5
§ 2	La transformation de Galilée, le Principe de re. de G....	5
§ 3	Mesure de la masse et de la force.....	8
§ 4	Addition des forces.....	9
§ 5	Interprétation de la loi d'addition des forces.....	9
	<b>Exercices</b> .....	11
<b>CHAPITRE II.</b>	<b>Difficultés de la Mécanique newtonienne</b> .....	13
§ 1	Vitesse des particules.....	13
§ 2	Le problème de l'électromagnétisme.....	13
§ 3	Expérience des deux barres.....	14
<b>CHAPITRE III</b>	<b>La Relativité restreinte : Cinématique</b> .....	17
§ 1	Le principe de Relativité restreinte.....	17
§ 2	Coordonnées d'un évènement.....	18
§ 3	La transformation spéciale de Lorentz.....	19
§ 4	Relativité de la simultanéité.....	22
§ 5	Dilatation des temps.....	22
§ 6	Temps propre.....	23
§ 7	Contraction des longueurs.....	24
§ 8	Les quadrivecteurs.....	24
§ 9	Le produit scalaire.....	29
§ 10	Conclusion.....	30
	<b>Exercice</b> .....	33
<b>CHAPITRE IV</b>	<b>La Relativité restreinte : Mécanique</b> .....	35
§ 1	Abandon de l'impulsion newtonienne.....	35
§ 2	L'impulsion relativiste.....	36
§ 3	Création d'une particule massique.....	40
§ 4	La force en Mécanique relativiste.....	43
§ 5	Quadrivecteur force.....	44
§ 6	Travail de la force.....	45
§ 7	Vitesse limite des particules matérielles.....	46
§ 8	Vitesse limite de toutes les interactions.....	46
§ 9	Les antiparticules.....	48
§ 10	Le problème des deux barres.....	50
§ 11	Calcul de la force électromagnétique dans les deux ref....	51

	<b>Exercices.....</b>	<b>53</b>
<b>CHAPITRE V</b>	<b>Electromagnétisme relativiste</b>	
	<b>Calcul tensoriel.....</b>	<b>57</b>
§ 1	Introduction.....	57
§ 2	Le tenseur électromagnétique.....	57
§ 3	Critère de tensorialité.....	60
§ 4	Egalité de deux tenseurs.....	60
§ 5	Le tenseur métrique.....	60
§ 6	Les formes linéaires.....	62
§ 7	Les tenseurs.....	64
§ 8	Identification d'un t. mix. d'ordre 2 à une app.lin.....	65
§ 9	Enlèvement d'une covariance d'un tenseur.....	65
§ 10	Composantes d'un tenseur.....	66
§ 11	Combinaison linéaire de deux tenseurs.....	67
§ 12	Abaissement et élévation d'indices.....	67
§ 13	Produit tensoriel.....	71
§ 14	Contraction.....	74
§ 15	Règle d'enlèvement d'une variance avec les composantes...	74
§ 16	Dérivation d'un champ de tenseur.....	76
§ 17	Electromagnétisme relativiste.....	79
§ 18	Effets magnétiques des courants électriques et relativité.	81
§ 19	Ce qui intervient : le quadrivecteur courant.....	82
§ 20	Invariance de jauge de l'électromagnétisme.....	83
§ 21	Création du quadrivecteur potentiel par le qua.vect. cour.	83
	<b>Exercices.....</b>	<b>86</b>
<b>CHAPITRE VI</b>	<b>Difficultés de la Relativité restreinte.....</b>	<b>89</b>
§ 1	Introduction.....	89
§ 2	Egalité de la masse inerte et de la masse grav.....	89
§ 3	Vérification expérimentale de l'égalité entre $m_i$ et $m_g$ ...	90
§ 4	La boîte aux deux photons.....	91
§ 5	Nécessité de cette égalité.....	92
§ 6	Unification de l'inertie et de la gravitation.....	93
§ 7	La force centrifuge et le principe de Mach.....	94
§ 8	La philosophie positiviste.....	94
§ 9	La force de Coriolis et le principe de Mach.....	97
§ 10	Difficulté d'une théorie complètement machienne.....	99
§ 11	Relativité du mouvement de rotation.....	101
§ 12	Interaction gravitationnelle et relativité.....	102
§ 13	Difficulté du concept de référentiel galiléen.....	106
§ 14	Expérience des deux barres.....	108
<b>CHAPITRE VII</b>	<b>Introduction à la Relativité générale.....</b>	<b>111</b>
§ 1	Le principe de relativité générale.....	111
§ 2	Les référentiels galiléens en Relativité générale.....	114
§ 3	L'espace-temps : une variété riemannienne.....	116
§ 4	Le principe de covariance généralisée.....	118
§ 5	Etude d'une fusée.....	120
§ 6	Vérifications expérimentales.....	123
§ 7	Déca. vers le r. par le principe de cons. de l'énergie...	125
§ 8	Etude du disque tournant : le temps.....	127
§ 9	Etude du disque tournant : l'espace.....	130
§ 10	Rôle de la M.Q. pour les étalons de longueurs et de temps.	134

§ 11 Les étalons de temps et de	longueurs.....	136
§ 12 Deux temps	différents?.....	139
§ 13 Effet Shapiro : retard des échos	radars.....	140
§ 14 La loi de la gravitation en Relativité	générale.....	143
	<b>Exercices.....</b>	<b>146</b>
<b>CHAPITRE VIII</b>	<b>Propriétés du tenseur d'impulsion-énergie.....</b>	<b>149</b>
§ 1 Définition générale du tenseur	d'impulsion-énergie.....	149
§ 2 Autre formulation pour le tenseur	d'impulsion-énergie.....	151
§ 3 Impulsion-énergie d'une particule de masse	négative.....	151
§ 4 Tenseur d'impulsion-énergie le plus	général.....	152
§ 5 Propriétés du tenseur	d'impulsion-énergie.....	152
§ 6 Interprétation des différentes composantes du	T.I.E.....	155
§ 7 Lien avec le tenseur des	contraintes.....	156
§ 8 Description des forces à	distance.....	159
§ 9 Condition de l'équilibre d'un	solide.....	160
§ 10 Valeur moyenne du tenseur	T.I.E.....	161
§ 11 La boîte aux deux	photons.....	163
§ 12 T.I.E. d'un fluide parfait au	repos.....	164
§ 13 Formulation indépendante du système de	coordonnée.....	166
§ 14 Trace du tenseur	d'impulsion-énergie.....	167
§ 15 Equation d'Euler d'un fluide parfait	relativiste.....	169
§ 16 Interprétation de "l'inertie" de la	pression.....	170
§ 17 Equilibre gravitationnel d'une	étoile.....	174
§ 18 L'énergie	gravitationnelle.....	175
§ 19 Cas d'une	étoile.....	176
§ 20 Valeur moyenne du T.I.E. dans un champ de	gravitation....	176
§ 21 T.I.E. du champ de	gravitation.....	177
§ 22 T.I.E. du champ	électromagnétique.....	178
§ 23 Etude d'un condensateur	plan.....	181
§ 24 Energie et particules de masses	négatives.....	182
§ 25 Etude d'une barre	tournante.....	184
§ 26 Etude d'une barre	élastique.....	185
	<b>Exercices.....</b>	<b>187</b>
<b>CHAPITRE IX</b>	<b>Analyse tensorielle en espace affine.....</b>	<b>189</b>
§ 1	Introduction.....	189
§ 2 Espace affine sur un espace	vectorel.....	189
§ 3 Système de	coordonnées.....	189
§ 4 Repère naturel associé à un système de cor.	curv.....	190
§ 5 Changement de coordonnées	curvilignes.....	194
§ 6 Dériv. cov. d'un vecteur dans un repère	mobile.....	196
§ 7 Dérivation covariante d'une forme linéaire "	".....	197
§ 8 Dérivation covariante d'un tenseur	quelconque.....	198
§ 9 Propriétés des symboles de	Christoffel.....	199
§ 10 Calcul de la divergence et du laplacien en coor.	curv....	200
§ 11 Equation des	droites.....	200
§ 12 Exemple en coordonnées	polaires.....	201
	<b>Exercice.....</b>	<b>203</b>
<b>CHAPITRE X</b>	<b>Analyse tensorielle dans un espace affine muni d'un produit scalaire.....</b>	<b>205</b>

§ 1	Le tenseur	métrique.....	205
§ 2	Calcul des symboles de	Christoffel.....	206
§ 3	Exemple en coordonnées polaires du	plan.....	207
§ 4	Les équations de	Lagrange.....	208
§ 5	Les droites comme chemins d'intervalle	stationnaire.....	209
§ 6	Les droites, chemins de longueur	minimale.....	210
§ 7	Cas de l'espace	pseudo-euclidien.....	210
§ 8	Cas des intervalles du genre	espace.....	212
§ 9	Cas des intervalles du genre	lumière.....	213
§ 10	Volume d'un	domaine.....	213
§ 11	Volume en coordonnées	curvilignes.....	216
§ 12	Expression de la	divergence.....	217
		<b>Exercices.....</b>	<b>220</b>
<b>CHAPITRE XI</b>	<b>Les variétés</b>	<b>différentiables.....</b>	<b>221</b>
§ 1	Définition d'une	variété.....	221
§ 2	Espace vectoriel	tangent.....	222
§ 3	Variétés	riemanniennes.....	224
§ 4	Transport parallèle d'un	vecteur.....	226
§ 5	Stabilité des	opérations.....	227
§ 6	Transport parallèle d'un	tenseur.....	228
§ 7	Conservation du produit	scalaire.....	228
§ 8	Transport parallèle d'un vecteur le long d'une	courbe....	229
§ 9	Transport parallèle d'un	tenseur.....	235
§ 10	Champ de vecteurs obtenu par transport	parallèle.....	235
§ 11	Vecteur libre sur la	variété.....	236
§ 12	Coordonnées associées à une base de vecteurs	libres.....	237
§ 13	Structure d'espace affine de la	variété.....	238
§ 14	Utilisation des formules dans une variété	riemannienne....	240
§ 15	Propriétés algébriques du tenseur de	courbure.....	240
§ 16	Nombre de composantes	indépendantes.....	242
§ 17	L'identité de	Bianchi.....	244
§ 18	Le tenseur	d'Einstein.....	244
§ 19	Déviations des	géodésiques.....	246
§ 20	Courbure de la	sphère.....	248
§ 21	La	tractrice.....	248
§ 22	Formule de	Stokes.....	250
§ 23	Interprétation de la formule de	Stokes.....	252
		<b>Exercices.....</b>	<b>255</b>
<b>CHAPITRE XII</b>	<b>Loi dynamique en Relativité</b>	<b>générale.....</b>	<b>257</b>
§ 1		Introduction.....	257
§ 2	L'espace-temps une variété différentiable	riemannienne....	257
§ 3	Trajectoire d'une particule	libre.....	260
§ 4	Trajectoire d'une particule en	interaction.....	260
§ 5	Tenseur d'impulsion-énergie dans un espace	courbe.....	262
§ 6	Etude du disque	tournant.....	264
§ 7	Equation des	géodésiques.....	265
§ 8		Conclusion.....	267
§ 9	Signification des	coordonnées.....	268
§ 10	Les	durées.....	269
§ 11		L'espace.....	271
§ 12	Les	distances.....	272

§ 13	La	simultanéité.....	273
§ 14	Champs stationnaires, champs	constants.....	274
§ 15	Lien entre tenseur métrique et forces de	gravitation.....	275
§ 16	Le problème des deux barres (barre	immobile).....	279
§ 17	Contraction des longueurs dans un champ de	gravitation...	282
§ 18	Barre défilant, particule	immobile.....	285
§ 19	Barre et particule	défilant.....	286
§ 20	Déviaton de la lumière dans un champ de	gravitation.....	288
§ 21	Influence de la contraction des	longueurs.....	289
§ 22	Déformation d'un référentiel	galiléen.....	293
		<b>Exercices.....</b>	<b>298</b>
<b>CHAPITREXIII</b>	<b>Loi de force en Relativité</b>	<b>générale.....</b>	<b>303</b>
§ 1		Introduction.....	303
§ 2	Indication sur la forme des	équations.....	303
§ 3	Cas limite de l'espace	plat.....	304
§ 4	L'équation du champ en espace	vide.....	305
§ 5	Utilisation du tenseur de	courbure.....	305
§ 6	Utilisation de la déviation des	géodésiques.....	308
§ 7	Calcul à la surface de la Terre (effet de	marée).....	310
§ 8	L'équation du champ en espace non	vide.....	312
§ 9	Analogie avec	l'électromagnétisme.....	315
§ 10	Accord des deux cas (vide, non	vide).....	315
§ 11	Non linéarité de l'équation du	champ.....	316
§ 12	La loi dynamique est contenue dans la loi de	force.....	317
§ 13	Lien entre le T.I.E. et le quadrivecteur	d'I.E.....	320
§ 14	L'EQ. du champ contient l'EQ. des	géodésiques.....	322
		<b>Exercice.....</b>	<b>325</b>
<b>CHAPITREXIV</b>	<b>Approximation linéaire de l'équation du champ..</b>		<b>327</b>
§ 1		Introduction.....	327
§ 2	Approximation	linéaire.....	328
§ 3	La jauge de	Lorentz.....	330
§ 4	Les ondes	gravitationnelles.....	332
§ 5	Gravitation	newtonienne.....	333
§ 6	Le problème des deux	barres.....	335
§ 7	Un problème	d'électrostatique.....	338
§ 8	Retour au disque	tournant.....	340
§ 9	Champ à l'intérieur d'une sphère	creuse.....	342
§ 10	Relativité générale et principe de	Mach.....	347
§ 11	Champ d'un astre	tournant.....	349
§ 12	Recherche d'une orbite	circulaire.....	351
§ 13	Effet d'entraînement des référentiels	d'inerties.....	352
		<b>Exercices.....</b>	<b>356</b>
<b>CHAPITREXV</b>	<b>L'énergie</b>	<b>gravitationnelle.....</b>	<b>359</b>
§ 1	Retour à l'approximation	linéaire.....	359
§ 2	Interprétation	physique.....	360
§ 3	Lien avec l'énergie	gravitationnelle.....	361
§ 4	L'énergie	gravitationnelle.....	362
§ 5	Le tenseur d'impulsion-énergie du champ	gravitationnel...	363
§ 6	Valeur	moyenne.....	365

§ 7	Quadrivecteur impulsion-énergie	total.....	366
§ 8	Conservation de	l'impulsion.....	367
§ 9	La	masse.....	369
§ 10	Partage avec les autres formes	d'énergie.....	371
§ 11	Localisation de l'énergie	gravitationnelle.....	371
§ 12	Le tenseur	Q.....	374
§ 13	Intégrale sur une surface englobant le	corps.....	375
§ 14	Calcul effectif d'une	énergie.....	376
CHAPITREXVI	<b>La solution de</b>	<b>Schwarzschild.....</b>	<b>379</b>
§ 1		Introduction.....	379
§ 2	Forme de l'élément linéaire	(symétries).....	379
§ 3	Calcul des symboles de	Christoffel.....	382
§ 4	Calcul des composantes du tenseur de	Ricci.....	383
§ 5	Résolution de l'équation du	champ.....	386
§ 6	Egalité de la masse inerte et de la masse	gravitationnelle	387
§ 7	La singularité de	Schwarzschild.....	389
§ 8	Equation des	géodésiques.....	391
§ 9	Résolution des	équations.....	392
§ 10	Approximation	newtonienne.....	393
§ 11	Etude générale du mouvement :	équations.....	394
§ 12	Potentiel efficace pour une masse non	nulle.....	395
§ 13	Discussion générale du	mouvement.....	396
§ 14	Cas des	photons.....	400
§ 15	Etude de l'orbite circulaire de la	lumière.....	401
§ 16	Temps de chute d'une	particule.....	403
§ 17	Extinction lors de la chute dans un trou	noir.....	404
§ 18	Déviations de la lumière par le	Soleil.....	406
§ 19	Précession du	périhélie.....	411
§ 20	Effet Shapiro : retard des échos	radars.....	416
§ 21	Ralentissement apparent de la vitesse de la	lumière.....	421
		<b>Exercices.....</b>	<b>424</b>
CHAPITREXVII	<b>La solution intérieure de</b>	<b>Schwarzschild.....</b>	<b>429</b>
§ 1		Introduction.....	429
§ 2	Composantes du tenseur	d'impulsion-énergie.....	430
§ 3	Nouvelle forme de l'équation du	champ.....	431
§ 4	Ecriture de l'équation du	champ.....	432
§ 5	Equation	dynamique.....	433
§ 6	La loi de force contient la loi	dynamique.....	435
§ 7	Bilan des	équations.....	436
§ 8	L'équation de	Tolman-Oppenheimer-Volkov.....	437
§ 9	Détermination de la	métrique.....	439
§ 10	Calcul de la	pression.....	443
§ 11	Energie gravitationnelle négative de formation de	l'étoile	446
		<b>Exercice.....</b>	<b>451</b>
CHAPITREXVIII	<b>Cosmologie</b>	<b>relativiste.....</b>	<b>453</b>
§ 1	Rôle de la Relativité générale en	cosmologie.....	453
§ 2	Description de	l'univers.....	454
§ 3	Les coordonnées de	Gauss.....	454
§ 4	Le postulat de	Weyl.....	459

§ 5	Le principe	cosmologique.....	459
§ 6	Utilisation du principe de	Mach.....	462
§ 7	La métrique de	Robertson-Walker.....	462
§ 8	Géométrie de l'espace pour	$k = 0$ .....	466
§ 9	Etude du cas	$k = - 1$ .....	466
§ 10	Etude pour	$k = + 1$ .....	468
§ 11	Volume de l'espace pour	$k = + 1$ .....	470
§ 12	La loi de	Hubble.....	471
§ 13	Temps de parcours de la	lumière.....	472
§ 14	Formule du décalage vers le	rouge.....	473
§ 15	Autre interprétation du décalage vers le	rouge.....	474
§ 16	Calcul des composantes du tenseur	d'impulsion-énergie....	477
§ 17	Etude des	équations.....	478
§ 18	Calcul des symboles de	Christoffel.....	479
§ 19	Calcul de	$R_{tt}$ .....	479
§ 20	Calcul de	$R_{ij}$ .....	480
§ 21	Calcul de la courbure	scalaire.....	480
§ 22	Composante de temps de l'équation	d'Einstein.....	481
§ 23	Equation	dynamique.....	481
§ 24	Résolution des	équations.....	484
§ 25	Lien avec les paramètres	observables.....	487
§ 26	Pourquoi la cosmologie	newtonienne.....	490
§ 27	Difficulté de la cosmologie	newtonienne.....	490
§ 28	La cosmologie newtonienne	.....	492
§ 29	Retour au théorème de	Birkhoff.....	494
§ 30	Justification de la cosmologie	newtonienne.....	495
§ 31	Détermination expérimentale de la constante de	Hubble....	497
§ 32	Distance	lumineuse.....	498
§ 33	Relation décalage vers le rouge distance	lumineuse.....	499
§ 34	Magnitude apparente et magnitude	absolue.....	502
§ 35	Résultats	expérimentaux.....	505
§ 36	L'ère de la matière	dominante.....	507
§ 37	Pression et densité de l'univers	actuel.....	508
§ 38	Résolution des	équations.....	511
§ 39	Variation du paramètre de	décélération.....	517
§ 40	Rela. déca. vers le rou. dist. lu. pour des dist.	quelc..	518
§ 41	Autres méthodes d'accès aux distances	lointaines.....	521
§ 42	Bilan des connaissances	actuelles.....	525
§ 43	Lien entre distance en a.l. et décalage vers le	rouge....	529
		<b>Exercices.....</b>	<b>531</b>

**CHAPITRE XIX      Quelques réflexions en guise de      conclusion..... 533**

§ 1		Introduction.....	533
§ 2	Les motivations de la Théorie de	Brans-Dicke.....	533
§ 3	Différence entre la Relativité générale et la Th. de	B.D..	534
§ 4	La Théorie de Brans-Dicke est non	locale.....	536
§ 5	La métrique de l'espace-temps dans la Théorie de	B.D.....	537
§ 6	Les masses négatives en Relativité	générale.....	538
§ 7	Les règles d'attraction-répulsion en Relativité	générale..	539
§ 8	Impulsion et masses	négatives.....	539
§ 9	Conclusion sur la	relativité.....	540
§ 10	Analogie des formules de l'électromagnétisme et de la	R.G.	541

**CORRIGE DES EXERCICES ..... 543**

**Chapitre 1 ..... 543**

<b>Chapitre 3</b> .....	546
<b>Chapitre 4</b> .....	547
<b>Chapitre 5</b> .....	552
<b>Chapitre 7</b> .....	557
<b>Chapitre 8</b> .....	564
<b>Chapitre 9</b> .....	568
<b>Chapitre 10</b> .....	568
<b>Chapitre 11</b> .....	569
<b>Chapitre 12</b> .....	577
<b>Chapitre 13</b> .....	602
<b>Chapitre 14</b> .....	603
<b>Chapitre 16</b> .....	609
<b>Chapitre 17</b> .....	623
<b>Chapitre 18</b> .....	625

INDEX ALPHABETIQUE .....	631
--------------------------	-----

