

# Table des matières

<b>I</b>	<b>TRONC COMMUN</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>ESPACE ET TEMPS</b>	<b>3</b>
1.1	L'objectif visé . . . . .	3
1.2	Notion d'espace . . . . .	3
1.2.1	Mesure des longueurs . . . . .	3
1.2.2	Espaces de référence . . . . .	4
1.3	Notion de temps . . . . .	5
1.3.1	Mesure des durées . . . . .	5
1.3.2	Chronologies, chronologie naturelle ou standard . . . . .	6
<b>2</b>	<b>REPÉRAGE D'UN ÉVÉNEMENT</b>	<b>7</b>
2.1	L'objectif visé . . . . .	7
2.2	Événement . . . . .	7
2.3	Repérage spatial d'un événement . . . . .	8
2.3.1	Distances . . . . .	8
2.3.2	Coordonnées spatiales d'un événement . . . . .	8
2.3.3	Géométrie d'un espace de référence . . . . .	9
2.3.4	Coordonnées cartésiennes orthogonales . . . . .	10
2.3.5	Groupe principal des transformations d'un espace de référence . . . . .	12
2.3.6	Grandeurs géométriques dans un espace de référence . . . . .	13
2.3.7	Base cartésienne orthonormée associée à un s.c.c.o. . . . .	14
2.3.8	Autres coordonnées utilisées en physique . . . . .	14
2.4	Repérage temporel d'un événement . . . . .	18
2.4.1	La problématique . . . . .	18
2.4.2	L'événement $E$ et l'événement origine $E_0$ sont coponctuels dans $\mathcal{E}$ . . . . .	19
2.4.3	L'événement $E$ et l'événement origine $E_0$ ne sont pas coponctuels dans $\mathcal{E}$ . Synchronisation des horloges . . . . .	19
2.4.4	Repère temporel . . . . .	22

2.4.5	Dates et durées . . . . .	22
2.4.6	Changements de dates . . . . .	22
2.4.7	Simultanéité de deux événements . . . . .	23
2.5	Référentiel . . . . .	23
<b>3</b>	<b>SCALAIRES, VECTEURS, ETC.</b>	<b>25</b>
3.1	L'objectif visé . . . . .	25
3.2	La révolution de Félix Klein . . . . .	26
3.3	Le groupe fondamental de l'espace euclidien . . . . .	26
3.3.1	L'ensemble des systèmes de coordonnées cartésiennes orthogonales admissibles . . . . .	26
3.3.2	Signification des matrices $A$ et $B$ . . . . .	30
3.3.3	Quelques résultats importants sur les matrices orthogonales . . . . .	30
3.3.4	La structure de groupe . . . . .	30
3.3.5	Sous groupes . . . . .	32
3.4	Qu'est-ce qu'un objet géométrique? . . . . .	33
3.5	Les scalaires et pseudo-scalaires . . . . .	33
3.6	Les vecteurs et pseudo-vecteurs . . . . .	34
3.7	Opérations sur les objets géométriques . . . . .	34
3.7.1	Opérations sur les scalaires . . . . .	34
3.7.2	Multiplication d'un vecteur par un scalaire . . . . .	35
3.7.3	Somme de deux vecteurs . . . . .	36
3.7.4	Différence de deux vecteurs . . . . .	38
3.7.5	Produit scalaire de deux vecteurs. Norme d'un vecteur . . . . .	38
3.7.6	Base cartésienne orthonormée (b.c.o.n.) associée à un s.c.c.o. . . . .	40
3.7.7	Produit vectoriel de deux vecteurs . . . . .	41
3.7.8	Produit mixte . . . . .	49
3.7.9	Généralisation des opérations . . . . .	50
3.8	Points de vue passif, actif . . . . .	52
3.9	Transport par des symétries . . . . .	52
3.9.1	Le processus . . . . .	52
3.9.2	Deux théorèmes utiles . . . . .	53
3.10	Exercices . . . . .	56
3.10.1	Utilisation des composantes . . . . .	56
3.10.2	Aire d'un parallélogramme . . . . .	56
3.10.3	Relations métriques dans un triangle quelconque . . . . .	56
3.10.4	Double produit vectoriel . . . . .	57
3.10.5	Décomposition d'un vecteur . . . . .	57
3.10.6	Division vectorielle . . . . .	57

3.10.7	Triple produit vectoriel de deux vecteurs . . . . .	58
3.10.8	Produit scalaire de deux produits vectoriels . . . . .	58
<b>4</b>	<b>MOUVEMENT D'UN POINT MOBILE</b>	<b>59</b>
4.1	L'objectif visé . . . . .	59
4.2	Trajectoire d'un point mobile . . . . .	59
4.3	Équations horaires . . . . .	60
4.4	Vecteur mobile . . . . .	61
4.5	Dérivée d'un vecteur mobile dans $\mathcal{R}$ . . . . .	61
4.5.1	Propriété / Définition . . . . .	61
4.5.2	Différentielle d'un vecteur mobile . . . . .	62
4.5.3	Propriétés . . . . .	63
4.6	Vecteur vitesse d'un point mobile dans $\mathcal{R}$ . . . . .	63
4.6.1	Définition . . . . .	63
4.6.2	Propriété . . . . .	63
4.7	Vecteur accélération d'un point mobile dans $\mathcal{R}$ . . . . .	64
4.7.1	Définition . . . . .	64
4.7.2	Propriétés . . . . .	64
4.8	Bases orthonormées mobiles de $\mathcal{R}$ . . . . .	65
4.8.1	L'idée . . . . .	65
4.8.2	Les trois bases mobiles à connaître . . . . .	66
4.9	Vecteur rotation dans $\mathcal{R}$ d'une base mobile . . . . .	69
4.9.1	Position du problème . . . . .	69
4.9.2	Définition . . . . .	69
4.9.3	Théorème fondamental . . . . .	69
4.9.4	Interprétation du vecteur rotation . . . . .	70
4.9.5	Un théorème intéressant pour évaluer le vecteur rotation . . . . .	72
4.10	Une autre dérivée utile . . . . .	74
4.11	Expressions des vecteurs dans les bases mobiles . . . . .	75
4.11.1	Dans la base mobile cylindrique $B_c^*(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$ . . . . .	75
4.11.2	Dans la base mobile sphérique $B_s^*(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_\varphi)$ . . . . .	77
4.11.3	Dans la base mobile de Frénet $B_F^*(\vec{e}_T, \vec{e}_N, \vec{e}_B)$ . . . . .	78
4.12	Mouvements remarquables . . . . .	82
4.12.1	Mouvements rectilignes . . . . .	82
4.12.2	Mouvements circulaires . . . . .	85
4.12.3	Mouvement hélicoïdal uniforme . . . . .	90
4.13	Exercices . . . . .	90
4.13.1	Mouvement hélicoïdal . . . . .	90
4.13.2	Effet Doppler . . . . .	91

<b>II</b>	<b>MECANIQUE NEWTONIENNE</b>	<b>93</b>
<b>5</b>	<b>LOIS DE NEWTON</b>	<b>95</b>
5.1	L'objectif visé . . . . .	95
5.2	La révolution newtonienne . . . . .	95
5.3	Les trois lois de Newton . . . . .	96
5.3.1	1 <sup>re</sup> loi de Newton, ou Principe de l'inertie . . . . .	96
5.3.2	2 <sup>e</sup> loi de Newton, ou relation fondamentale de la dynamique . . . . .	97
5.3.3	3 <sup>e</sup> loi de Newton, ou Principe des actions réciproques, ou Principe de l'action et de la réaction . . . . .	97
5.3.4	Signification . . . . .	97
5.3.5	Le statut mathématique des forces . . . . .	98
5.4	La masse . . . . .	98
5.5	Les forces . . . . .	99
5.6	Les forces à distance à connaître . . . . .	100
5.6.1	Forces gravitationnelles . . . . .	100
5.6.2	Forces électrostatiques . . . . .	101
5.6.3	Poids . . . . .	101
5.7	Les forces de contact à connaître . . . . .	102
5.7.1	Forces de liaison . . . . .	102
5.7.2	Tension d'un ressort . . . . .	103
5.7.3	Forces exercées par un fluide . . . . .	105
5.7.4	Forces de frottement solide . . . . .	106
5.8	Les référentiels galiléens . . . . .	109
5.8.1	La classe des référentiels galiléens . . . . .	109
5.8.2	Recherche des référentiels galiléens . . . . .	110
5.9	Lois déduites de la 2 <sup>e</sup> loi de Newton . . . . .	111
5.10	Lois déduites des 2 <sup>e</sup> et 3 <sup>e</sup> lois de Newton . . . . .	112
5.11	Exercices . . . . .	112
5.11.1	Pendule conique . . . . .	112
5.11.2	Traction . . . . .	112
5.11.3	Pousser ou tirer ? . . . . .	113
5.11.4	Balistique . . . . .	114
5.11.5	Relèvement des virages . . . . .	115
<b>6</b>	<b>PUISSANCE, TRAVAIL, ÉNERGIES</b>	<b>117</b>
6.1	L'objectif visé . . . . .	117
6.2	En guise d'introduction : un petit calcul heuristique . . . . .	118
6.3	Puissance d'une force dans un référentiel . . . . .	119
6.3.1	Définition/ Unité . . . . .	119

6.3.2	Propriétés . . . . .	119
6.3.3	Exemples . . . . .	119
6.4	Travail d'une force dans un référentiel . . . . .	120
6.4.1	Travail élémentaire . . . . .	120
6.4.2	Le statut mathématique du travail élémentaire . . . . .	120
6.4.3	Travail fini . . . . .	121
6.4.4	Importance du référentiel . . . . .	123
6.5	Énergie cinétique. Théorèmes associés . . . . .	123
6.5.1	Définitions . . . . .	123
6.5.2	Théorème de la puissance cinétique . . . . .	125
6.5.3	Théorème de l'énergie cinétique . . . . .	125
6.6	Force conservative. Energie potentielle . . . . .	125
6.6.1	Définition d'un champ de force conservatif . . . . .	126
6.6.2	Caractérisations d'un champ de force conservatif . . . . .	126
6.6.3	Énergie potentielle associée à un champ de force conservatif . . . . .	126
6.7	Énergie mécanique. Théorèmes associés . . . . .	133
6.7.1	Énergie mécanique . . . . .	134
6.7.2	Théorème de l'énergie mécanique . . . . .	134
6.7.3	Théorème de la puissance mécanique . . . . .	135
6.7.4	Conservation de l'énergie mécanique . . . . .	135
6.8	Énergie potentielle et stabilité d'un équilibre . . . . .	136
6.9	Un organigramme pour calculer le travail . . . . .	137
6.10	Exercices . . . . .	138
6.10.1	Etude d'un champ de forces . . . . .	138
6.10.2	Fronde sur un plan horizontal . . . . .	138
<b>7</b>	<b>MOMENTS</b> . . . . .	<b>141</b>
7.1	L'objectif visé . . . . .	141
7.2	En guise d'introduction : un petit calcul heuristique . . . . .	141
7.3	Moment cinétique d'un point matériel . . . . .	142
7.4	Moment d'une force . . . . .	142
7.5	Propriétés des moments d'un vecteur . . . . .	143
7.6	Détermination du moment par rapport à un axe . . . . .	144
7.7	Théorème du moment cinétique (TMC) . . . . .	146
7.8	Conservation éventuelle du moment cinétique . . . . .	147
7.9	Théorème du moment cinétique en projection sur un axe fixe $\Delta$ . . . . .	147
7.10	Quand est-il intéressant d'utiliser le TMC ? . . . . .	148
7.10.1	Idée générale . . . . .	148
7.10.2	Exemple illustratif : le pendule simple . . . . .	148

<b>8</b>	<b>CHANGEMENT DE RÉFÉRENTIEL</b>	<b>153</b>
8.1	L'objectif visé . . . . .	153
8.2	Les postulats de la cinématique classique (prérelativiste) . . . . .	154
8.2.1	Principe de relativité cinématique ( $\mathbf{P}_1$ ) . . . . .	154
8.2.2	Caractère absolu du temps ( $\mathbf{P}_2$ ) . . . . .	154
8.2.3	Conséquence : caractère absolu de la distance entre deux événements simultanés ( $\mathbf{P}$ ) . . . . .	154
8.3	La propriété fondamentale . . . . .	155
8.4	Transformation de la dérivée d'un vecteur mobile. Vecteur vitesse angulaire de rotation de $\mathcal{R}'$ dans $\mathcal{R}$ . . . . .	156
8.5	Transformation des vitesses et accélérations . . . . .	157
8.5.1	Les notations adoptées . . . . .	157
8.5.2	Transformation des vitesses . . . . .	159
8.5.3	Transformation des accélérations . . . . .	160
8.6	Composition des vecteurs rotation . . . . .	162
8.7	Mouvements remarquables de référentiels . . . . .	163
8.7.1	Translation . . . . .	163
8.7.2	Rotation autour d'un axe fixe . . . . .	165
8.8	Cinématique du solide . . . . .	169
8.9	Retour sur les notations . . . . .	169
<b>9</b>	<b>DYNAMIQUE EN RÉFÉRENTIEL NON GALILÉEN</b>	<b>173</b>
9.1	L'objectif visé . . . . .	173
9.2	Rappel des lois de Newton . . . . .	174
9.3	Les référentiels galiléens . . . . .	174
9.3.1	La classe des référentiels galiléens . . . . .	174
9.3.2	Le principe de relativité . . . . .	176
9.4	Dynamique en référentiel non galiléen . . . . .	177
9.5	Théorèmes de la puissance et de l'énergie cinétique . . . . .	178
9.6	Recherche des référentiels galiléens . . . . .	179
9.6.1	Test du référentiel terrestre $\mathcal{R}_T$ . . . . .	179
9.6.2	Test du référentiel géocentrique $\mathcal{R}_G$ . . . . .	182
9.6.3	Test du référentiel de Kepler $\mathcal{R}_K$ . . . . .	185
9.6.4	Test du référentiel de Copernic $\mathcal{R}_C$ . . . . .	188
9.7	Retour sur la définition du poids . . . . .	189
9.8	Exercices . . . . .	190
9.8.1	Étude du champ de marée . . . . .	190

<b>10</b>	<b>SYSTÈME DE DEUX POINTS MATÉRIELS</b>	<b>193</b>
10.1	L'objectif visé . . . . .	193
10.2	Grandeurs dynamiques globales pour un système de 2 particules	193
10.3	Les deux lois vectorielles . . . . .	194
10.3.1	Théorème de la résultante cinétique (TRC) . . . . .	194
10.3.2	Théorème du moment cinétique (TMC) . . . . .	195
10.4	Centre d'inertie et théorèmes le concernant . . . . .	196
10.4.1	Définition . . . . .	196
10.4.2	Détermination pratique . . . . .	197
10.4.3	Nouvelle expression de la résultante cinétique . . . . .	197
10.4.4	Nouvelle écriture du théorème de la résultante cinétique : théorème du centre d'inertie (TCI) . . . . .	197
10.4.5	Théorème du moment cinétique en $G$ . . . . .	198
10.4.6	Remarque sur les notations . . . . .	199
10.5	Théorème de la puissance cinétique (TPC) . . . . .	199
10.6	Énergie potentielle d'interaction . . . . .	200
10.7	Energie mécanique du système. TPM . . . . .	202
10.8	Résolution générale du problème à deux corps . . . . .	203
10.8.1	La méthode . . . . .	203
10.8.2	L'équation différentielle que vérifie $\vec{R}(t)$ . . . . .	203
10.8.3	L'équation différentielle que vérifie $\vec{r}(t)$ . . . . .	203
10.8.4	Résumé . . . . .	206
10.9	Système isolé . . . . .	207
10.10	Champ gravitationnel uniforme . . . . .	209
10.11	Exploitation des lois de conservation . . . . .	210
10.11.1	Moment cinétique . . . . .	210
10.11.2	Énergie . . . . .	212
<b>11</b>	<b>L'INTERACTION GRAVITATIONNELLE</b>	<b>213</b>
11.1	L'objectif visé . . . . .	213
11.2	Conservation du moment cinétique : loi des aires . . . . .	214
11.3	Conservation de l'énergie . . . . .	215
11.4	Énergie potentielle effective. Discussion . . . . .	215
11.5	Le problème des équations horaires . . . . .	217
11.6	Détermination des trajectoires . . . . .	218
11.7	Etude quantitative des états liés . . . . .	220
11.7.1	Les trajectoires elliptiques . . . . .	220
11.7.2	Représentation du vecteur excentricité . . . . .	222
11.7.3	Expression remarquable de l'énergie . . . . .	222
11.7.4	Relation période-demi grand axe . . . . .	223
11.7.5	Cas particulier des trajectoires circulaires . . . . .	224

11.8	Trajectoires des deux points matériels réels . . . . .	225
11.8.1	Cas général . . . . .	225
11.8.2	Cas important où l'une des particules est beaucoup plus massive que l'autre . . . . .	226
11.9	Les trois vitesses cosmiques . . . . .	227
11.9.1	1 <sup>re</sup> vitesse cosmique . . . . .	227
11.9.2	2 <sup>e</sup> vitesse cosmique . . . . .	228
11.9.3	3 <sup>e</sup> vitesse cosmique . . . . .	228
11.10	Exercices . . . . .	230
11.10.1	Chute d'une sonde sur le soleil . . . . .	230
11.10.2	Satellite géostationnaire . . . . .	232
<b>12</b>	<b>OSCILLATEURS</b>	<b>233</b>
12.1	L'objectif visé . . . . .	233
12.2	Le dispositif étudié . . . . .	234
12.3	Oscillations libres . . . . .	235
12.3.1	Oscillateur harmonique . . . . .	237
12.3.2	Oscillateur amorti . . . . .	241
12.3.3	Pseudo-période et période propre . . . . .	244
12.3.4	Temps de relaxation . . . . .	245
12.3.5	Mesure du facteur de qualité . . . . .	248
12.3.6	Considérations énergétiques . . . . .	249
12.4	Oscillations forcées . . . . .	256
12.4.1	Régime transitoire et régime harmonique forcé . . . . .	258
12.4.2	Résonance . . . . .	259
12.5	ANNEXE Equations différentielles . . . . .	263
12.5.1	Equation différentielle du 1 <sup>er</sup> ordre, linéaire, homogène, à coefficients constants de même signe . . . . .	263
12.5.2	Equation différentielle du 2 <sup>e</sup> ordre, linéaire, homogène, à coefficients constants de même signe . . . . .	263
12.6	Exercices . . . . .	266
12.6.1	Associations de deux ressorts . . . . .	266
12.6.2	Pendule élastique vertical avec deux ressorts . . . . .	267
12.6.3	Pendule cycloïdal de Huygens . . . . .	268
12.6.4	Oscillations sur une tige en rotation . . . . .	269
12.6.5	Oscillateur élastique en chute libre . . . . .	270
<b>13</b>	<b>CHOCS</b>	<b>271</b>
13.1	L'objectif visé . . . . .	271
13.2	Impulsion d'une force. Théorème de la quantité de mouvement	271
13.3	Une analogie instructive . . . . .	273



13.4	Modèle du choc de deux particules . . . . .	274
13.5	Conservation de la quantité de mouvement . . . . .	276
13.6	Conservation ou pas de l'énergie cinétique . . . . .	277
13.7	Choc frontal élastique . . . . .	279
13.7.1	1 <sup>re</sup> méthode : Conservation de la quantité de mouvement et de l'énergie . . . . .	279
13.7.2	2 <sup>e</sup> méthode : Changement de référentiel . . . . .	281
13.8	Exercices . . . . .	284
13.8.1	Procès-verbal d'accident routier . . . . .	284
13.8.2	Etude d'un choc élastique entre deux particules . . . . .	284
<b>III RELATIVITE RESTREINTE</b>		<b>287</b>
<b>14 ETAT DES LIEUX DE LA PHYSIQUE EN 1905</b>		<b>289</b>
14.1	L'objectif visé . . . . .	289
14.2	Cinématique prérelativiste . . . . .	289
14.3	Dynamique prérelativiste . . . . .	290
14.3.1	Les postulats et hypothèses spécifiques . . . . .	290
14.3.2	Le principe de relativité . . . . .	290
14.3.3	Groupe de transformations de Galilée . . . . .	290
14.3.4	Recherche d'un référentiel galiléen . . . . .	291
14.3.5	Transformation des vitesses et des accélérations . . . . .	291
14.3.6	Vitesses mutuelles, vitesses relatives . . . . .	292
14.3.7	Transformation spéciale de Galilée . . . . .	292
14.4	Electrodynamique . . . . .	293
14.4.1	Les équations de l'électrodynamique . . . . .	293
14.4.2	Non invariance de forme des équations sous le groupe de Galilée . . . . .	293
14.4.3	Recherche de l'éther . . . . .	294
<b>15 LA RELATIVITE RESTREINTE</b>		<b>295</b>
15.1	L'objectif visé . . . . .	295
15.2	Les postulats adoptés . . . . .	295
15.3	L'article d'Einstein de 1905 . . . . .	296
15.4	Des expériences par la pensée édifiantes . . . . .	298
15.4.1	Synchronisation des horloges dans un référentiel inertiel à l'aide de signaux lumineux . . . . .	298
15.4.2	Relativité de la simultanéité . . . . .	299
15.4.3	Principe de Relativité et distances transverses . . . . .	302
15.4.4	Dilatation des durées et contraction des longueurs . . . . .	303

15.5	Conséquence algorithmique des postulats . . . . .	310
15.5.1	Groupe de Poincaré . . . . .	310
15.5.2	Transformation spéciale de Lorentz . . . . .	313
15.5.3	Paramètre vitesse ou rapidité . . . . .	316
15.5.4	Composition des vitesses de translation . . . . .	316
15.5.5	Notation vectorielle des transformations spéciales de Lorentz . . . . .	317
15.6	Exercices . . . . .	318
15.6.1	Composition des vitesses de translation . . . . .	318
<b>16</b>	<b>L'ESPACE-TEMPS RELATIVISTE</b>	<b>319</b>
16.1	L'objectif visé . . . . .	319
16.2	Relativité de la coponctualité . . . . .	319
16.3	Relativité de la simultanéité . . . . .	320
16.4	Relativité des durées . . . . .	320
16.5	Relativité des longueurs . . . . .	321
16.6	Relativité des volumes . . . . .	322
16.7	Relativité des angles . . . . .	322
16.8	Intervalle d'univers entre deux événements . . . . .	322
16.8.1	Argument heuristique : retour sur l'horloge photonique transverse . . . . .	322
16.8.2	Propriété/ Définition . . . . .	323
16.9	Espace-temps . . . . .	325
16.10	Exercices . . . . .	327
16.10.1	Voyageur de Langevin (version 1) . . . . .	327
16.10.2	Effet Doppler . . . . .	327
<b>17</b>	<b>VITESSES ET ACCÉLÉRATIONS</b>	<b>329</b>
17.1	L'objectif visé . . . . .	329
17.2	Vitesses . . . . .	329
17.2.1	Transformation des composantes . . . . .	329
17.2.2	Transformation de la norme. Tardyons et tachyons . . . . .	331
17.3	Transformation des accélérations . . . . .	332
17.4	Temps propre. Référentiel inertiel tangent . . . . .	333
17.4.1	Temps propre . . . . .	333
17.4.2	Référentiel inertiel tangent . . . . .	334
17.4.3	Interprétation du temps propre $\tau$ . . . . .	335
17.5	Quadrivecteur vitesse . . . . .	335
17.6	Quadrivecteur accélération . . . . .	337
17.7	Exercices . . . . .	339
17.7.1	Phénomène d'aberration de la lumière . . . . .	339

17.7.2	Formule de Fresnel . . . . .	340
17.7.3	Lame de verre embarquée . . . . .	340
17.7.4	Méthode de synchronisation de Metz-Bridgman . . . . .	342
17.7.5	Voyageur de Langevin (version 2) . . . . .	342
<b>18</b>	<b>DYNAMIQUE (I). QUANTITÉ ÉNERGIE</b>	<b>343</b>
18.1	L'objectif visé . . . . .	343
18.2	Quadrivecteur quantité de mouvement-énergie . . . . .	344
18.2.1	Principe d'invariance de la masse . . . . .	344
18.2.2	Recherche d'une définition de la quantité de mouvement relativiste . . . . .	344
18.2.3	Que représente $P^0$ ? . . . . .	345
18.2.4	Les trois énergies relativistes . . . . .	346
18.2.5	La quantité énergie . . . . .	346
18.2.6	Les différentes formules utiles . . . . .	347
18.2.7	Les unités commodes . . . . .	348
18.2.8	L'omission de $c$ . . . . .	349
18.2.9	La limite classique . . . . .	350
18.2.10	Le cas du photon . . . . .	351
18.2.11	Les particules ultrarelativistes . . . . .	351
18.3	Quantité énergie d'un système sans interaction . . . . .	352
18.3.1	Définition . . . . .	352
18.3.2	Genre du quadrivecteur quantité énergie . . . . .	353
18.3.3	Référentiel barycentrique $\mathcal{R}^*$ . . . . .	353
18.4	Collisions relativistes . . . . .	357
18.4.1	Définitions . . . . .	357
18.4.2	Lois de Conservation . . . . .	357
18.5	Collisions élastiques de deux particules . . . . .	359
18.5.1	Étude dans le référentiel barycentrique $\mathcal{R}^*$ . . . . .	360
18.5.2	Étude dans $\mathcal{R}$ où la particule 2 est au repos . . . . .	361
18.6	L'effet Compton . . . . .	361
18.6.1	Définition . . . . .	361
18.6.2	Modélisation . . . . .	362
18.7	Collision inélastique . . . . .	363
18.7.1	Définition . . . . .	363
18.7.2	Classification . . . . .	363
18.7.3	Seuil . . . . .	363
18.7.4	Calcul du seuil . . . . .	364
18.7.5	Exemple . . . . .	365
18.8	Exercices . . . . .	365
18.8.1	Étude d'un choc élastique entre deux particules . . . . .	365

18.8.2	Effet Compton . . . . .	367
18.8.3	Désintégration en vol . . . . .	368
18.8.4	Choc élastique . . . . .	368
18.8.5	Fusion de deux particules . . . . .	369
18.8.6	Réaction de matérialisation . . . . .	369
<b>19</b>	<b>DYNAMIQUE RELATIVISTE (II). FORÇANCE</b>	<b>371</b>
19.1	L'objectif visé . . . . .	371
19.2	Définition de la force . . . . .	372
19.3	La 2 <sup>e</sup> loi de Newton revisitée . . . . .	373
19.4	Quadrivecteur force . . . . .	374
19.4.1	Définition . . . . .	374
19.4.2	Propriétés . . . . .	374
19.4.3	Composantes . . . . .	375
19.5	Les théorèmes concernant l'énergie . . . . .	375
19.5.1	Transformation des composantes de la force et de la puissance . . . . .	376
19.6	Mouvement dans un champ électromagnétique . . . . .	377
19.6.1	Mouvement d'une particule chargée dans un champ électrique constant et uniforme . . . . .	378
19.6.2	Mouvement d'une particule chargée dans un champ magnétique constant et uniforme . . . . .	382
<b>IV</b>	<b>SOLUTIONS DES EXERCICES</b>	<b>387</b>
<b>20</b>		<b>389</b>
	Chapitre 3 . . . . .	389
	Chapitre 4 . . . . .	395
	Chapitre 5 . . . . .	401
	Chapitre 6 . . . . .	416
	Chapitre 9 . . . . .	419
	Chapitre 11 . . . . .	422
	Chapitre 12 . . . . .	427
	Chapitre 13 . . . . .	441
	Chapitre 15 . . . . .	447
	Chapitre 16 . . . . .	448
	Chapitre 17 . . . . .	451
	Chapitre 18 . . . . .	461
	<b>Bibliographie</b>	<b>475</b>
	<b>Index</b>	<b>479</b>