

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION – IMPORTANCE DE LA RELATIVITÉ	9
1. LA RELATIVITE GALILÉENNE	13
1.1 Principe de relativité galiléenne.....	13
1.1.1 Expérience sur un navire à voile	13
1.1.2 Le navire est-il immobile ou en mouvement ?	14
1.1.3 Principe de relativité galiléenne	14
1.2 Relations entre les référentiels galiléens	15
1.2.1 La transformation de Galilée	16
1.2.2 Invariance des lois de la mécanique classique	16
1.3 La vérité scientifique se définit sur le plan du phénomène	17
1.3.1 La science se limite aux phénomènes	18
1.3.2 La mathématisation de la physique	18
2. INVARIANCE NON GALILÉENNE DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME	19
2.1 La lumière, onde ou particule ?	19
2.1.1 Mesure de la vitesse de la lumière	19
2.1.2 La lumière devient une substance corpusculaire	20
2.1.3 La théorie ondulatoire de la lumière s'impose	21
2.2 Des expériences qui défient la relativité galiléenne	21
2.2.1 Une obscure clarté tombe des étoiles	21
2.2.2 De la lumière dans l'eau courante	22
2.2.3 Expérience de Michelson et Morley	23
2.3 Invariance de l'électromagnétisme	24
2.3.1 La transformation de Woldemar Voigt	24
2.3.2 La transformation de Lorentz	26
2.4 De nombreux créateurs de la relativité	27
2.4.1 De Galilée à Henri Poincaré et Albert Einstein.....	27
2.4.2 Henri Poincaré	27
2.4.3 Albert Einstein	28
2.5 Exercices	29
3. LA RELATIVITÉ RESTREINTE ISSUE DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME	31
3.1 Révision de la relativité galiléenne	31
3.2 Fondements de la relativité restreinte par Henri Poincaré	32
3.2.1 Extension du principe de relativité galiléenne	32
3.2.2 Synchronisation des horloges dans un référentiel	33
3.2.3 Décalage horaire entre des horloges en mouvement	34

3.2.4	La transformation dite de Lorentz	35
3.2.5	L'invariant fondamental de la relativité restreinte	35
3.3	Des fondements de la relativité restreinte par Albert Einstein	35
3.3.1	Extension du principe de relativité galiléenne	36
3.3.2	Synchronisation des horloges	36
3.3.3	Décalage horaire des horloges en mouvement	37
3.3.4	Calcul de la transformation de Lorentz	37
3.3.5	Interprétation de la notion de temps	37
3.4	Calcul rapide de la transformation de Lorentz	38
3.5	Études critiques du fondement de la relativité basé sur l'électromagnétisme	40
4.	LA RELATIVITÉ RESTREINTE ISSUE DES SYMÉTRIES DE L'ESPACETEMPS	43
4.1	Hypothèses sur l'espace et le temps	43
4.1.1	Homogénéité de l'espace	43
4.1.2	Isotropie de l'espace	44
4.1.3	Homogénéité du temps	44
4.1.4	Symétries et invariance	44
4.2	Principe de relativité de Poincaré	45
4.2.1	Énoncé du principe de relativité de Poincaré	45
4.2.2	Référentiels équivalents	45
4.2.3	Le principe de relativité conduit à la structure de groupe des T.L.	46
4.3	Principe de causalité	46
4.4	Transformation spéciale de Lorentz	46
4.4.1	Définition de la transformation spéciale de Lorentz	47
4.4.2	Linéarité des relations entre coordonnées	47
4.4.3	Invariance issue de l'isotropie de l'espace	48
4.4.4	Invariance de forme par transformation inverse	48
4.4.5	Invariance de forme par composition des transformations	49
4.4.6	Valeurs de k physiquement admissibles	50
4.4.7	Apparition d'une constante fondamentale	51
4.4.8	La transformation spéciale de Lorentz	51
4.5	Relativité du temps	52
4.5.1	La constante de structure conditionne la notion de temps	52
4.5.2	Relativité de la simultanéité	53
4.5.3	Durée propre entre deux évènements situés au même point	54
4.6	Relativité des longueurs	54
4.6.1	Longueur propre	54
4.6.2	Réciprocité de la relativité des longueurs	55
4.6.3	Influence du temps sur la relativité des longueurs	55
4.7	Vérifications expérimentales	56
4.8	Exercices	57
5.	MÉCANIQUE RELATIVISTE	61
5.1	Cinématique relativiste	61
5.1.1	Relation entre les vitesses dans des référentiels différents	62
5.1.2	Composition de vitesses parallèles	62
5.1.3	Vitesse propre	62
5.2	Dynamique relativiste	63
5.2.1	Postulat fondamental de la dynamique relativiste	63
5.2.2	Force et accélération non colinéaires	64
5.2.3	Force et accélération colinéaires	65

5.3	Équivalence entre l'énergie et la masse au repos	65
5.3.1	La radioactivité montre que la matière peut émettre de l'énergie.....	65
5.3.2	Variation de la masse par absorption ou émission de chaleur	66
5.3.3	Variation de l'énergie d'un électron en mouvement	67
5.3.4	Spectromètre de masse	67
5.3.5	Vérification directe de l'équivalence entre masse et énergie	67
5.4	Énergie d'une particule en relativité restreinte	68
5.4.1	Énergie de masse et énergie cinétique	68
5.4.2	Relation entre impulsion et énergie	69
5.4.3	Apparition de l'antimatière	69
5.4.4	Particules de masse nulle	70
5.5	Vérifications expérimentales	70
5.5.1	Invariance de la vitesse de la lumière	71
5.5.2	Les accélérateurs de particules	72
5.6	Exercices	73
6.	L'ESPACETEMPS DE POINCARÉ-MINKOWSKI	77
5.5	Représentations de l'espacetemps	77
6.1.1	Espacetemps de Poincaré	77
6.1.2	Rotations de l'espacetemps	78
6.1.3	Groupe de Poincaré	80
6.1.4	Espacetemps de Minkowski	80
6.1.5	Produit scalaire de Minkowski	80
6.2	Propriétés des quadrivecteurs	81
6.2.1	Transformation de Lorentz d'un quadrivecteur	81
6.2.2	Produit scalaire et norme	82
6.2.3	Respect du principe de causalité	82
6.3	Quadrivecteurs particuliers	84
6.3.1	Ligne d'univers et quadrivitesse d'une particule	84
6.3.2	Quadriaccélération d'une particule	84
6.3.3	Quadri-impulsion d'une particule	85
6.4	Exercices	86
7.	IDÉES DE BASE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE	89
7.1	La loi de la gravitation doit être modifiée	89
7.2	Équivalence gravitation/accélération	90
7.2.1	Principe d'équivalence de Newton	90
7.2.2	Mesures dans des champs de gravitation et d'accélération	91
7.2.3	Principe d'équivalence d'Einstein	92
7.2.4	Équivalence locale entre gravitation et accélération	92
7.3	Systèmes de référence équivalents	92
7.3.1	Extension du principe de relativité	93
7.3.2	Une idée audacieuse	93
7.4	Nécessité d'une géométrie non euclidienne	93
7.4.1	Système de référence en rotation	94
7.4.2	Décalage gravitationnel de la fréquence d'un photon.....	95
7.4.3	Mesure du décalage gravitationnel en laboratoire.....	95
7.5	Systèmes de référence	96
7.5.1	Des systèmes de référence difficiles à inventer.....	96
7.5.2	Espace non euclidien : surface sphérique à deux dimensions	97
7.5.3	Coordonnées curvilignes de Gauss	98

7.5.4	Distance entre deux points infiniment proches	99
7.6	Principe de relativité généralisé	100
7.6.1	« Mollusque de référence » à quatre dimensions	101
7.6.2	Formulation exacte du principe de relativité généralisé	101
7.6.3	Métrique d'un « Mollusque de référence »	102
7.7	La matière-énergie déforme l'espacetemps	103
7.7.1	Riemann s'interroge sur les fondements de la géométrie	103
7.7.2	L'exemple d'espace non euclidien de Henri Poincaré	103
7.7.3	Chronogéométrie de l'espacetemps	104
7.8	L'espacetemps riemannien	104
7.8.1	Courbure de l'espacetemps	105
7.8.2	Le principe des géodésiques	105
7.9	Les équations d'Einstein	105
8.	LE CALCUL TENSORIEL S'IMPOSE EN RELATIVITÉ	107
8.1	Conventions de notation	107
8.1.1	Convention de sommation	107
8.1.2	Convention de notation d'indice primé	108
8.2	Types de composantes des vecteurs	109
8.2.1	Produit scalaire	109
8.2.2	Composantes contravariantes d'un vecteur	109
8.2.3	Composantes covariantes d'un vecteur	110
8.2.4	Relations entre composantes contravariantes et covariantes	110
8.2.5	Produit scalaire en fonction des composantes covariantes	111
8.2.6	Remarques à propos des composantes covariantes	111
8.3	Espaces ponctuels	111
8.3.1	Définition d'un espace ponctuel	112
8.3.2	Repères d'un espace ponctuel	112
8.3.3	Notation indicielle des dérivées partielles	112
8.3.4	Coordonnées curvilignes	113
8.3.5	Repère naturel d'un système de coordonnées curvilignes	113
8.3.6	Élément linéaire d'un espace ponctuel	114
8.3.7	Changement de base naturelle d'un espace vectoriel	114
8.3.8	Transformation des composantes d'un vecteur	115
8.4	Définition des tenseurs	115
8.4.1	Tenseur d'ordre zéro et d'ordre un	116
8.4.2	Exemple d'un tenseur d'ordre deux : le tenseur métrique	116
8.4.3	Produit tensoriel de vecteurs	117
8.4.4	Définition des tenseurs d'ordre deux	118
8.4.5	Tenseurs d'ordre quelconque	118
8.5	Opérations sur les tenseurs	119
8.5.1	Espace vectoriel de tenseurs	119
8.5.2	Produit scalaire	119
8.5.3	Contraction des indices	120
8.5.4	Critères de tensorialité	120
8.6	Covariance des lois de la physique	121
8.6.1	Tenseurs d'ordre 1	122
8.6.2	Tenseurs d'ordre n	122
8.6.3	Invariance des lois de la physique	123
8.7	Tenseurs contravariants et covariants	123
8.7.1	Vecteurs contravariants et covariants	123
8.7.2	Tenseurs contravariants et covariants	124
8.8	Exercices	125

9. GRAVITATION RELATIVISTE	129
9.1 Définition des espaces riemanniens	129
9.1.1 Métriques des espace de Riemann	129
9.1.2 Métriques euclidienne et riemannienne	130
9.1.3 Propriétés des espaces de Riemann	130
9.2 Tenseur de courbure	131
9.2.1 Transport parallèle dans un espace euclidien	131
9.2.2 Transport parallèle dans un espace riemannien	131
9.2.3 Détermination du tenseur de courbure	132
9.2.4 Expression du tenseur de courbure en coordonnées normales	132
9.2.5 Composantes indépendantes	133
9.3 Espacetemps à courbure riemannienne	133
9.3.1 Métrique spatiale riemannienne	134
9.3.2 Temps propre	134
9.3.3 Distance spatiale infinitésimale	135
9.4 Équations d'Einstein	135
9.4.1 Déformation de l'espacetemps de la relativité restreinte	135
9.4.2 Contraintes imposées aux équations d'Einstein	136
9.4.3 Équations de la gravitation relativiste	137
9.4.4 « Rigidité » de l'espacetemps	138
9.4.5 Résolution des équations du champ de gravitation	139
9.5 Champ de gravitation central symétrique	139
9.5.1 Champ à symétrie centrale dans le vide	139
9.5.2 Singularité de Schwarschild	140
9.5.3 Champ à symétrie centrale à l'intérieur de la matière	141
9.5.4 Trous noirs	141
10. VALIDATIONS EXPÉRIMENTALES	143
10.1 Avance du périhélie de Mercure	143
10.1.1 Insuffisance de la théorie newtonienne	143
10.1.2 Avances du périhélie des planètes	144
10.2 Déviation des rayons lumineux	144
10.2.1 Principe de la vérification expérimentale	145
10.2.2 L'éclipse du 29 mai 1919	145
10.2.3 Retards d'échos radar renvoyés par une planète	146
10.2.4 Mirages gravitationnels	147
10.3 Décalage gravitationnel de la fréquence d'un rayonnement	148
10.3.1 Mesures du décalage gravitationnel	148
10.3.2 Système de positionnement GPS	148
10.4 Ondes gravitationnelles	149
10.4.1 Émission radio d'un pulsar	149
10.4.2 Pulsars binaires	150
10.4.3 Pulsar binaire PSR 1913+16	150
10.5 Expansion de l'Univers	151
10.5.1 L'Univers statique d'Einstein	151
10.5.2 Les Univers non statiques	152
10.5.3 Les Univers de Friedmann	153
10.5.4 Le Big Bang	154
BIBLIOGRAPHIE	155