

L'HISTOIRE DES SCIENCES  
PRÉFACE TEXTES ET ÉTUDES ÉDITION

---

---

# LA NOTION DE TEMPS

## ÉQUIVALENCE AVEC L'ESPACE

PAR

**Olivier COSTA DE BEAUREGARD**

*Directeur de Recherches au C.N.R.S.*

*Seconde édition augmentée*

PARIS

LIBRAIRIE PHILOSOPHIQUE J. VRIN

6, PLACE DE LA SORBONNE, V<sup>e</sup>

—  
1983

TABLE DES MATIÈRES

01

PRÉFACE À LA NOUVELLE ÉDITION . . . . .	5
AVERTISSEMENT . . . . .	15
INTRODUCTION. ESQUISSE D'ENSEMBLE DE LA PHYSIQUE THÉORIQUE. . . . .	17
1. Généralités. . . . .	17
2. La géométrie d'Euclide. . . . .	17
3. De la Cinématique. . . . .	18
4. La « Mécanique rationnelle » classique. . . . .	18
5. L'Electromagnétisme classique. . . . .	19
6. L'Optique classique. . . . .	21
7. La Thermodynamique classique. . . . .	22
8. La Théorie cinétique de la chaleur. . . . .	23
9. La Physique du xx <sup>e</sup> siècle. L'avènement des théories de la Relativité et des Quanta. . . . .	24
10. Une discipline nouvelle : la Cybernétique. . . . .	25
11. La grande et permanente option de la Physique : modélisme ou formalisme? . . . . .	26
12. Un nouveau « climat » de l'humanisme. . . . .	28
CHAPITRE I. LE PRINCIPE DE RELATIVITÉ ET LA SPATIALISATION DU TEMPS. . . . .	
A. INTRODUCTION. . . . .	29
1. Temps et mouvement. . . . .	29
2. Un peu d'analyse dimensionnelle. Constantes universelles. Equivalence entre grandeurs . . . . .	30
B. LA « MÉCANIQUE RATIONNELLE » CLASSIQUE ET LE « TEMPS LÉGAL ». . . . .	33
3. Mécanique céleste, mécanique terrestre. . . . .	33
4. La « cinématique céleste » de Képler, annonciatrice du temps nouveau . . . . .	34
5. Le temps de Galilée, grandeur mesurable. . . . .	34
6. Temps mesurable et principe de relativité. . . . .	35
7. Les repères galiléens et l'expérience. . . . .	36
8. Les chronomètres de Huygens. . . . .	37
9. Newton et la synthèse des mécaniques céleste et terrestre. . . . .	38
10. Irrégularités et usure au cœur de l'horloge céleste. . . . .	39
11. Contrôle de la marche de la Terre par les horloges à quartz et les horloges « atomiques ». . . . .	40

C. L'OPTIQUE CINÉMATIQUE, D'ARAGO (1818) A MICHELSON-MORLEY (1887) . . .	41
12. Mauvais ajustement entre la Cinématique et la Dynamique classiques. . .	41
13. L'espace absolu et l'éther. . . . .	43
14. Les effets Römer (1676) et Doppler (1842). L'effet Bradley (1728) ou « aberration ». Mesures de la vitesse de la lumière sur un parcours aller simple. . . . .	43
15. L'expérience d'Arago (1818) et la « formule d'entraînement de l'éther » de Fresnel. . . . .	45
16. L'accumulation des expériences du premier ordre en $\beta$ entre Arago (1818) et Michelson-Morley (1887). . . . .	46
17. Nouveaux aperçus théoriques à la fin de la période considérée. . . . .	47
18. L'expérience du second ordre en $\beta$ de Michelson-Morley (1887). Formule de contraction des longueurs matérielles sous le vent d'éther, de Fitzgerald et de Lorentz. . . . .	47
19. Voigt (1887), Lorentz, Poincaré sont-ils les découvreurs de la théorie de la relativité?. . . . .	48
20. Le postulat du groupe, clé de la théorie de la relativité. . . . .	50
21. Un autre aspect de l'occasion manquée par la théorie de la relativité : les constantes universelles de l'Electromagnétisme. . . . .	51
22. Accélération et rotations en Optique. . . . .	52
D. L'ÉQUIVALENCE PHYSIQUE ENTRE ESPACE ET TEMPS DIRECTEMENT INDUITE DE L'EXPÉRIENCE DE MICHELSON-MORLEY. . . . .	53
23. L'expérience de Michelson-Morley et la métrologie optique. . . . .	54
24. Chronométrie hertzienne : la réalisation de l'horloge aristotélicienne idéale. . . . .	54
25. Méthodes modernes de mesure de $c$ . . . . .	56
26. Mesures de $c$ , ou bientôt mesures des distances en fonction de $c$ posé a priori ? . . . . .	56
E. LES ÉTALONS DE LONGUEUR ET DE TEMPS DE L'ASTRONOMIE. . . . .	56
27. L'année lumière . . . . .	56
28. Le parsec et son rattachement au mètre. . . . .	57
29. La seconde astronomique et son rattachement à la seconde des « chronomètres atomiques » terrestres. . . . .	57
30. Variations séculaires de la valeur de $c$ mesurée en termes du mètre étalon et de la seconde astronomique. . . . .	59
F. ÉPILOGUE ET PERSPECTIVES. . . . .	59
31. La notion aristotélicienne du temps (en tant que rattachée plus particulièrement au « mouvement local ») est définitivement accomplie par Einstein et Minkowski . . . . .	59
32. Identification de la Cinématique et de l'Optique du vide. . . . .	60
33. L'Optique comme Dynamique limite. . . . .	61
34. Conclusion . . . . .	62
CHAPITRE II. LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE ET L'ESPACE-TEMPS DE MINKOWSKI. . . . .	63
A. LA CINÉMATIQUE RELATIVISTE. . . . .	63
1. La constante universelle d'Einstein $c$ . . . . .	63
2. Le $ds^2$ de Minkowski. Equivalence physique entre l'espace et le temps. . . . .	65
3. Le « second principe » de la théorie de la Relativité . . . . .	70

4. Trajectoires d'espace-temps. Le « voyageur en boulet » de Langevin . . .	72
5. La géométrie intrinsèque de l'espace-temps et la Physique « sub specie aeternitatis » . . . . .	73
6. Le calcul tensoriel à quatre dimensions. Les invariants intégraux de Poincaré-Cartan . . . . .	74
7. Densités et grandeurs finies. . . . .	76
8. Le principe de relativité généralisée, successeur de l'ancien principe du mouvement relatif . . . . .	77
<b>B. L'ÉLECTROMAGNÉTISME RELATIVISTE. . . . .</b>	<b>79</b>
9. Si l'Optique est la racine de la théorie de la Relativité, l'Electromagnétisme en est le tronc. . . . .	79
10. La forme quadridimensionnelle de la théorie du champ de Maxwell-Lorentz. . . . .	81
11. Force, énergie, quantité de chaleur. . . . .	82
12. Le tenseur « élastique » de Maxwell-Minkowski et les flux de Poynting. Les densités de couple et de spin d'E. Henriot. . . . .	84
13. Conclusion. . . . .	84
<b>C. LA DYNAMIQUE RELATIVISTE . . . . .</b>	<b>85</b>
14. La présence et le rôle de la constante $c$ en Dynamique. . . . .	85
15. Dynamique relativiste des milieux continus. L'équivalence entre énergie et masse dans le rapport $c^2$ . . . . .	85
16. La déduction des formules de la Dynamique relativiste du point à partir de celles des milieux continus. . . . .	87
17. Dynamique analytique du point électriquement chargé. Sa compatibilité avec les « conditions de Quanta ». . . . .	89
<b>D. COMPLÉMENTS DE DYNAMIQUE RELATIVISTE . . . . .</b>	<b>90</b>
18. La théorie des milieux continus et des points matériels doués de spin. . .	90
19. La théorie relativiste du centre de gravité. . . . .	91
20. Principes généraux de la Mécanique analytique relativiste des systèmes de points en interaction selon Wheeler et Feynman. . . . .	93
21. Isomorphisme entre la Dynamique relativiste des systèmes de points de Wheeler et Feynman et la Statique classique des systèmes de fils. . . .	94
<b>E. COMPLÉMENTS D'OPTIQUE RELATIVISTE. BRÈVE INTRODUCTION A LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE . . . . .</b>	<b>97</b>
22. Généralités . . . . .	97
23. L'onde plane monochromatique et le quadrivecteur fréquence spatio-temporelle. Le théorème de la vitesse de groupe de Louis de Broglie. . . .	97
24. Théorie relativiste de l'aberration et de l'effet Doppler. « L'effet Doppler transversal ». . . . .	98
25. La relation universelle de Louis de Broglie entre impulsion — énergie des points matériels et quadrifréquence des « ondes matérielles ». . . . .	99
26. L'expérience de pensée de la diffraction-hachage d'une onde lumineuse ou matérielle; la « diffraction d'espace-temps ». . . . .	99

<b>CHAPITRE III. BRÈVE HISTOIRE DE CINQUANTE ANS DE PHYSIQUE : LE DÉVELOPPEMENT TOURMENTÉ DE LA THÉORIE DES QUANTA . . . . .</b>	<b>101</b>
<b>A. « L'ANCIENNE THÉORIE DES QUANTA » (1900-1925). . . . .</b>	<b>101</b>
1. Foisonnement de faits expérimentaux en Physique atomique aux alentours de 1900. . . . .	101
2. Planck résout l'énigme de la théorie du rayonnement thermique et découvre une nouvelle constante universelle. . . . .	102
3. Les photons (Lichtquanten) d'Einstein. . . . .	103
4. Niels Bohr et la théorie des spectres optiques. . . . .	104
5. Sommerfeld et la première théorie quantique et relativiste de l'électron (1916). . . . .	106
6. Le « principe d'exclusion » de Pauli (1924) ; le « spin de l'électron » (Uhlenbeck et Goudsmit, 1925). . . . .	106
7. Les deux statistiques quantiques. La relation entre spin et statistique. . . . .	107
<b>B. DE LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE (1925) A LA FORME COVARIANTE RELATIVISTE DE LA THÉORIE QUANTIQUE DES CHAMPS (1950). . . . .</b>	<b>108</b>
8. La Mécanique ondulatoire à l'approximation géométrique (Louis de Broglie, 1923-1925). . . . .	108
9. Heisenberg et Schrödinger découvrent le formalisme mathématique de la « nouvelle théorie des Quanta » (1925-1926). . . . .	112
10. Relations d'indétermination de Heisenberg (1927). . . . .	118
11. Doctrine de la Complémentarité de Bohr. . . . .	119
12. Superquantification (1927-1928). . . . .	120
13. Théorie du spin (Pauli, 1927). . . . .	121
14. Equations d'ondes covariantes relativistes : théorie de l'électron de Dirac (1927). . . . .	121
15. Equations d'ondes covariantes relativistes : théorie générale des particules à spin. . . . .	124
16. Le laborieux développement de la Théorie quantique des champs, ou les années du « conflit de la Relativité des Quanta » (1927-1950). . . . .	125
17. La forme explicitement relativiste de la Théorie quantique des champs (1946-1950). . . . .	128
<b>C. DEUX GRANDS PROBLÈMES IMPARFAITEMENT RÉSOLUS. . . . .</b>	<b>131</b>
18. Mécanique ondulatoire des systèmes de particules en interaction. . . . .	131
19. Radicale insuffisance de la théorie de la renormalisation. . . . .	132
<b>D. LE MONDE EFFERVESCENT DES PARTICULES ÉLÉMENTAIRES. . . . .</b>	<b>134</b>
20. Une société de près de trente membres au code minutieux et complexe. . . . .	134
21. Hélicité ou chiralité des interactions faibles. Questions connexes. . . . .	137
<b>CHAPITRE IV. LA MÉCANIQUE ONDULATOIRE « SUPERQUANTIFIÉE », THÉORIE SYNTHÉTIQUE DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE ET DES QUANTA. . . . .</b>	<b>141</b>
<b>A. LES MERVEILLEUX SECRETS DE LA PHYSIQUE DES ONDES . . . . .</b>	<b>141</b>
1. Généralités. . . . .	141
2. Spin. Superquantification. Doctrine de la Complémentarité. . . . .	143
3. Le conflit et la réconciliation de la Relativité et des Quanta. . . . .	144

B. L'EXPRESSION RELATIVISTE DU FORMALISME QUANTIQUE. . . . .	145
4. Le cas des ondes matérielles libres. . . . .	145
5. Le cas des ondes matérielles plongées dans un autre champ. . . . .	146
6. La superquantification . . . . .	146
7. La description d'interaction de Tomonaga (1946) - Schwinger (1948). . . . .	147
8. La description à la Heisenberg. . . . .	148
C. LA COMPLÉMENTARITÉ ENTRE LES DESCRIPTIONS D'INTERACTION ET A LA HEISENBERG EXPRIME UN TRAIT FONDAMENTAL DE LA PHILOSOPHIE NATURELLE. . . . .	150
9. Généralités. Un premier mot sur la complémentarité entre nombres d'occupation et phases. . . . .	150
10. Les paradoxes opposés du déterminisme radical et de l'aléatoire radical. . . . .	150
11. Application des vues précédentes à la discussion de quelques expériences de pensées typiques. . . . .	154
D. RÉSUMÉ DES CARACTÈRES DE LA TRANSITION QUANTIQUE ET DE LA MESURE EN MICROPHYSIQUE . . . . .	159
12. L'originalité des ondes de la microphysique par rapport à celles de la macrophysique. . . . .	159
13. La complémentarité entre nombres d'occupation et phases. . . . .	161
14. La totale symétrie passé-futur du phénomène élémentaire individuel. . . . .	163
15. Le schème abstrait de l'acte de mesure au niveau quantique. . . . .	164
16. Covariance relativiste et covariance quantique. . . . .	166
E. PARTICULES ET ANTIPARTICULES. LES RÈGLES DE CALCUL DE FEYNMAN. . . . .	167
17. Retour sur l'expérience de pensée de la diffraction-hachage d'une onde matérielle. . . . .	167
18. Les règles de Feynman. . . . .	170
F. NOTRE RÉPONSE A LA QUESTION : QU'EST-CE QU'UN CORPUSCULE? . . . . .	172
19. La liaison universelle instituée par Louis de Broglie, puis par Dirac, entre le géométrique et le dynamique. . . . .	172
20. Les relations d'indétermination de Heisenberg. . . . .	174
21. Le gracieux apologue des robes et des mannequins. . . . .	175
CHAPITRE V. LES PROBLÈMES PÉRIPHÉRIQUES DE LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE. . . . .	177
A. LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE . . . . .	177
1. Généralités. . . . .	177
2. Le principe de relativité généralisée et l'idée d'une géométrie curviligne de l'espace-temps. . . . .	179
3. Le postulat de la loi des géodésiques. . . . .	182
4. La relation du champ à ses sources. Loi classique de Poisson, loi nouvelle d'Einstein. . . . .	183
5. Les trois effets nouveaux prédits par la Relativité généralisée. . . . .	185
6. Progrès récents en théorie de la Relativité générale . . . . .	187
7. Progrès récents en expérimentation de la Relativité générale . . . . .	187

<b>B. VERS LA RÉCONCILIATION DES FORMALISMES DE LA RELATIVITÉ GÉNÉRALE ET DES QUANTA. VERS LA QUANTIFICATION DU CHAMP DE GRAVITATION. . . .</b>	<b>188</b>
8. Prologue : les théories linéaires du graviton (Pauli-Fierz, 1940 ; M <sup>me</sup> Tonnelat, 1941-1944). . . . .	188
9. L'équivalence entre inertie et gravitation d'Einstein (1911) et l'harmonie préétablie de la Relativité générale et des Quanta. . . . .	190
10. Du statut de la théorie des ondes en géométrie riemannienne. Une mutation imposée à la théorie des Quanta. . . . .	192
11. La quantification du champ gravitationnel selon A. Lichnerowicz (1960). . . . .	195
<b>C. LES DIFFICULTÉS DE LA « THÉORIE UNITAIRE », OU « IL N'EST PAS DIT QUE LA NATURE JOUE TOUJOURS LE MÊME JEU » . . . . .</b>	<b>197</b>
12. Généralités . . . . .	197
13. Pourquoi l'auteur de ces lignes est depuis longtemps sceptique quant à la « théorie unitaire de la gravitation et de l'électromagnétisme ». . . . .	199
<b>CHAPITRE VI. LES CORRÉLATIONS D'EINSTEIN (1927) OU D'EINSTEIN-PODOLSKY-ROSEN (1935) . . . . .</b>	<b>201</b>
1. Prologue : Einstein au 5 <sup>e</sup> Conseil Solvay (1927) . . . . .	201
2. L'expérience-type de corrélation en 1972-1982 : cascades atomiques . . . . .	203
3. Matrice S et CPT-invariance . . . . .	206
4. Calcul explicite de la corrélation de polarisation . . . . .	209
<b>CONCLUSION : LA PHYSIQUE « SUB SPECIE ÆTERNITATIS » . . . . .</b>	<b>213</b>