

# Table des matières

<b>Préface</b>	<b>xi</b>
<b>Avant-propos</b>	<b>xiii</b>
<b>0 Formalisme de base de la mécanique quantique standard</b>	<b>1</b>
0.A Système physique général . . . . .	2
0.A.1 Espace des états quantiques . . . . .	2
0.A.2 Opérateurs, hermiticité . . . . .	3
0.A.3 Probabilités . . . . .	5
0.A.4 Évolution dans le temps . . . . .	6
0.A.5 Opérateur densité . . . . .	7
0.A.5.a Définition . . . . .	7
0.A.5.b États purs et mélanges statistiques . . . . .	8
0.A.5.c Évolution temporelle . . . . .	9
0.A.5.d Entropie statistique . . . . .	9
0.A.6 Un cas simple : le spin $1/2$ . . . . .	10
0.B Réunion de plusieurs systèmes physiques . . . . .	11
0.B.1 Produit tensoriel . . . . .	11
0.B.2 Ensemble de spins $1/2$ . . . . .	13
0.B.3 Traces partielles . . . . .	14
0.C Particules dans un potentiel . . . . .	15
0.C.1 Une seule particule . . . . .	15
0.C.1.a Fonction d'onde . . . . .	16
0.C.1.b Équation de Schrödinger, courant de probabilité . . . . .	17
0.C.2 Spin, expérience de Stern et Gerlach . . . . .	17
0.C.2.a Introduction du spin . . . . .	17
0.C.2.b Espace des états . . . . .	19
0.C.3 Plusieurs particules . . . . .	20
<b>1 Perspective historique</b>	<b>23</b>
1.A Trois périodes . . . . .	24
1.A.1 Préhistoire . . . . .	25

1.A.2	La période ondulatoire . . . . .	26
1.A.3	Émergence de l'interprétation de Copenhague . . . . .	27
1.B	Le vecteur d'état . . . . .	29
1.B.1	Définition, équation de Schrödinger, règle de Born . . .	30
1.B.1.a	Définition . . . . .	30
1.B.1.b	Équation de Schrödinger . . . . .	31
1.B.1.c	Règle de Born, probabilités . . . . .	31
1.B.2	Processus de mesure . . . . .	32
1.B.2.a	Von Neumann, la réduction . . . . .	32
1.B.2.b	Bohr . . . . .	34
1.B.3	Statut . . . . .	35
1.B.3.a	Deux extrêmes . . . . .	35
1.B.3.b	Le point de vue (orthodoxe) de Copenhague, interprétation standard . . . . .	37
<b>2</b>	<b>Situation actuelle, des difficultés conceptuelles subsistent</b>	<b>41</b>
2.A	La chaîne (ou régression) sans fin de Von Neumann . . . . .	43
2.B	Le chat de Schrödinger . . . . .	46
2.B.1	L'argument . . . . .	46
2.B.2	Malentendus . . . . .	49
2.B.3	Les chats nouvelle vague . . . . .	50
2.C	L'ami de Wigner . . . . .	50
2.D	Mesures négatives et « sans interaction » . . . . .	52
2.E	Une grande variété de points de vue . . . . .	56
2.F	Des arguments peu convaincants . . . . .	61
<b>3</b>	<b>Le théorème d'Einstein, Podolsky et Rosen</b>	<b>63</b>
3.A	Un théorème . . . . .	64
3.B	Des pois, des gousses, et de leurs gènes . . . . .	66
3.B.1	Une expérience simple ; pas de conclusion à ce stade . .	66
3.B.2	Corrélations ; les causes dévoilées . . . . .	67
3.C	Transposition à la physique . . . . .	70
3.C.1	L'argument EPR pour deux particules microscopiques corrélées . . . . .	70
3.C.2	La réponse de Bohr . . . . .	73
3.C.3	Localité ; séparabilité . . . . .	76
3.C.4	L'argument EPR pour des systèmes macroscopiques . .	78
<b>4</b>	<b>Le théorème de Bell</b>	<b>81</b>
4.A	Inégalités de Bell . . . . .	82
4.A.1	Mécanique quantique : deux spins dans un état singulet	82
4.A.2	Réalisme local : démonstration de l'inégalité BCHSH . .	83
4.A.3	Contradiction entre l'inégalité et la mécanique quantique . . . . .	84

4.A.4	Contenu logique . . . . .	88
4.A.5	Contradiction avec les expériences . . . . .	89
4.B	Diverses formes du théorème . . . . .	91
4.B.1	Autres inégalités . . . . .	91
4.B.1.a	Inégalités de Wigner . . . . .	91
4.B.1.b	Inégalité de Mermin . . . . .	93
4.B.2	Autres hypothèses de départ . . . . .	95
4.B.3	Généralisations du théorème ; rôle de la localité . . . . .	96
4.B.4	Statut du théorème ; tentatives de le contourner . . . . .	99
4.C	Théorème de Cirel'son . . . . .	100
4.C.1	Mesures sur deux systèmes à deux niveaux . . . . .	100
4.C.2	Violation quantique maximale . . . . .	101
4.D	Non-transmission de signaux instantanés . . . . .	103
4.D.1	Conditions NS de non-transmission instantanée de signaux . . . . .	104
4.D.2	Boîtes logiques . . . . .	105
4.D.2.a	Boîtes déterministes . . . . .	105
4.D.2.b	Boîtes stochastiques . . . . .	106
4.D.3	Boîte de Popescu-Rohrlich et corrélations « superquantiques » . . . . .	108
4.D.4	Comment caractériser la théorie quantique ? . . . . .	110
4.E	Impact du théorème ; où en sommes-nous ? . . . . .	112
4.E.1	Échappatoires, conspirations . . . . .	113
4.E.1.a	Échappatoire de l'échantillon biaisé (« efficiency loophole ») . . . . .	114
4.E.1.b	Conspiration des polariseurs/analyseurs (communication loophole) . . . . .	118
4.E.1.c	Fatalisme contre libre arbitre . . . . .	119
4.E.1.d	Crédibilité des échappatoires . . . . .	121
4.E.2	La mécanique quantique est-elle non-locale ? Contrafactualité . . . . .	121
<b>5</b>	<b>Autres théorèmes</b>	<b>125</b>
5.A	Contradictions GHZ . . . . .	125
5.A.1	Démonstration . . . . .	125
5.A.2	Discussion . . . . .	128
5.B	Généralisations de GHZ . . . . .	130
5.C	Inégalité de Cabello . . . . .	133
5.C.1	Réalisme local . . . . .	134
5.C.2	Contradiction avec la mécanique quantique . . . . .	135
5.D	Impossibilités de Hardy . . . . .	136
5.E	Théorème de Bell-Kochen-Specker ; contextualité . . . . .	139
5.E.1	Particule de spin 1 . . . . .	139

5.E.2	Deux particules de spin 1/2, règle du produit . . . . .	141
5.E.3	Contextualité et réalisme local . . . . .	142
<b>6</b>	<b>Intrication quantique</b>	<b>145</b>
6.A	Une notion purement quantique . . . . .	146
6.A.1	La partie et le tout . . . . .	147
6.A.2	Deux origines possibles des corrélations . . . . .	149
6.B	Caractérisations de l'intrication . . . . .	150
6.B.1	Décomposition de Schmidt d'un état pur . . . . .	150
6.B.2	Entropies statistiques . . . . .	153
6.B.3	Monogamie . . . . .	154
6.B.4	Critère de séparabilité pour l'opérateur densité . . . . .	155
6.C	Création et perte de l'intrication . . . . .	156
6.C.1	Intrication par interactions locales . . . . .	157
6.C.2	Échange d'intrication . . . . .	158
6.C.3	Décohérence . . . . .	160
6.C.3.a	Mécanisme . . . . .	160
6.C.3.b	Retour sur le chat de Schrödinger . . . . .	162
6.C.4	Purification, distillation . . . . .	165
6.C.5	Intrication et processus de mesure quantique . . . . .	166
6.C.5.a	Modèle de Von Neumann . . . . .	166
6.C.5.b	Ambiguïté dans l'intrication . . . . .	167
6.C.5.c	Effet de l'environnement ; états pointeurs . . . . .	168
6.C.5.d	Le paradoxe de Hund . . . . .	170
6.D	Cryptographie quantique, téléportation . . . . .	171
6.D.1	Théorèmes : non-clonage et non-détermination d'un état unique . . . . .	172
6.D.1.a	Non-clonage . . . . .	172
6.D.1.b	Non-détermination avec une seule réalisation . . . . .	174
6.D.2	Distribution de clés cryptographiques . . . . .	175
6.D.2.a	Idée générale . . . . .	175
6.D.2.b	Exemples de protocoles d'échange de clés . . . . .	176
6.D.3	Téléportation d'un état quantique . . . . .	182
6.E	Calcul quantique et information . . . . .	184
6.E.1	Principe général . . . . .	185
6.E.2	Portes quantiques et algorithmes . . . . .	185
6.E.3	Codes de correction quantique des erreurs . . . . .	187
<b>7</b>	<b>Expériences : la réduction quantique vue en temps réel</b>	<b>189</b>
7.A	Ion unique dans un piège . . . . .	190
7.B	Électron unique piégé . . . . .	195
7.C	Mesure du nombre de photons dans une cavité . . . . .	195
7.D	Phase spontanée de condensats de Bose-Einstein . . . . .	199
7.D.1	Interférences dans une région de l'espace . . . . .	200

7.D.2	Une variable supplémentaire ? . . . . .	201
7.D.3	Non-localité de la phase . . . . .	203
<b>8</b>	<b>Diverses interprétations</b>	<b>207</b>
8.A	Pragmatisme dans les laboratoires . . . . .	208
8.A.1	Interrompre « à la main » la chaîne de Von Neumann . . . . .	208
8.A.1.a	Décohérence macroscopique . . . . .	209
8.A.1.b	Effet de la prise de conscience . . . . .	210
8.A.2	Interprétation des corrélations . . . . .	210
8.A.2.a	Calcul de la probabilité associée à une séquence de mesures . . . . .	211
8.A.2.b	La réduction du vecteur d'état devient inutile . . . . .	213
8.A.2.c	Discussion . . . . .	214
8.A.3	Mettre l'accent sur l'information . . . . .	215
8.B	Interprétation statistique . . . . .	217
8.C	Interprétation relationnelle, vecteur d'état relatif . . . . .	218
8.C.1	Interprétation relationnelle . . . . .	218
8.C.2	Point de vue informationnel pur . . . . .	220
8.D	Logique quantique ; approches axiomatiques . . . . .	221
8.E	Le réel voilé . . . . .	223
8.F	Variables supplémentaires (« cachées ») . . . . .	223
8.F.1	Théorie de De Broglie-Bohm . . . . .	225
8.F.1.a	Cadre général . . . . .	225
8.F.1.b	Trajectoires bohmienne . . . . .	228
8.F.1.c	Mesure quantique en théorie de Bohm . . . . .	234
8.F.1.d	Théorie des champs . . . . .	236
8.F.1.e	Discussion . . . . .	236
8.F.2	Mécanique de Nelson . . . . .	243
8.G	Interprétation modale . . . . .	244
8.H	Dynamique de Schrödinger modifiée . . . . .	246
8.H.1	Évolution des idées . . . . .	248
8.H.1.a	Premiers travaux . . . . .	248
8.H.1.b	Localisation spontanée par sauts (« hits ») . . . . .	249
8.H.1.c	Localisation spontanée continue . . . . .	252
8.H.1.d	Liens avec la gravité . . . . .	256
8.H.1.e	Liens avec la relativité . . . . .	256
8.H.1.f	Liens avec l'expérience . . . . .	257
8.H.2	Description de la réalité dans le cadre d'une théorie à dynamique modifiée . . . . .	258
8.H.3	Systèmes quantiques ouverts en mécanique quantique standard . . . . .	262
8.I	Interprétation transactionnelle . . . . .	262
8.J	Histoires cohérentes . . . . .	263
8.J.1	Histoires, familles d'histoires . . . . .	264

8.J.2	Familles cohérentes . . . . .	265
8.J.3	Évolution quantique d'un système isolé . . . . .	267
8.J.4	Incompatibilité des familles différentes . . . . .	269
8.J.4.a	Comparaison avec d'autres interprétations . . . . .	270
8.J.5	Une profusion d'histoires ; discussion . . . . .	273
8.K	Interprétation d'Everett . . . . .	275
8.K.1	Aucune limite pour l'équation de Schrödinger . . . . .	275
8.K.2	Développement logique de l'interprétation . . . . .	277
8.K.3	Discussion . . . . .	281

## **Conclusion** **283**

## **9 Appendices** **287**

9.A	Appendice A : Contenu « mental » du vecteur d'état . . . . .	287
9.B	Appendice B : Inégalités de Bell et théories locales non-déterministes . . . . .	289
9.C	Appendice C : Une tentative pour construire une théorie quantique « séparable » (non-déterministe mais locale) . . . . .	290
9.D	Appendice D : Probabilité maximale pour un état particulier . . . . .	293
9.E	Appendice E : Influence d'une sélection des paires observées . . . . .	293
9.E.1	Sélection indépendante des paramètres de mesure . . . . .	294
9.E.2	Sélection dépendante des paramètres de mesure . . . . .	296
9.F	Appendice F : Impossibilité d'une transmission superluminale de messages . . . . .	297
9.F.1	Introduction . . . . .	297
9.F.2	Un premier schéma . . . . .	299
9.F.3	Généralisation . . . . .	300
9.G	Appendice G : Mesures quantiques à des instants différents . . . . .	301
9.G.1	Formule de Wigner . . . . .	302
9.G.2	Règle de Born généralisée . . . . .	304
9.H	Appendice H : Manipulation des variables supplémentaires . . . . .	306
9.I	Appendice I : Corrélations en théorie de Bohm . . . . .	308
9.I.1	Fonction de corrélation temporelle . . . . .	308
9.I.2	Corrélations de deux particules . . . . .	310
9.I.2.a	Expérience EPRB . . . . .	310
9.I.2.b	Interférences à deux photons . . . . .	311
9.J	Appendice J : Modèles de réduction spontanée du vecteur d'état . . . . .	312
9.J.1	Un seul opérateur . . . . .	312
9.J.1.a	Équation d'évolution . . . . .	312
9.J.1.b	Solution de l'équation . . . . .	313
9.J.1.c	La règle de probabilité CSL . . . . .	313
9.J.2	Plusieurs opérateurs . . . . .	314
9.J.2.a	Équation d'évolution . . . . .	315

9.J.2.b	Émergence spontanée d’une localisation du vecteur d’état . . . . .	316
9.K	Appendice K : Familles d’histoires cohérentes . . . . .	316
<b>Bibliographie</b>		<b>319</b>
<b>Table des figures</b>		<b>347</b>
<b>Index</b>		<b>349</b>

**This page intentionally left blank**