

Table des matières

Préface	ix
Avant-propos	xi
I Perspective historique	1
A Trois périodes	2
A-1 Préhistoire	3
A-2 La période ondulatoire	4
A-3 Emergence de l'interprétation de Copenhague	5
B Le vecteur d'état	8
B-1 Définition, équation de Schrödinger, règle de Born	8
B-2 Processus de mesure	10
B-3 Statut	14
C Autres formalismes, théorie des champs, intégrales de chemin	19
II Situation actuelle, des difficultés conceptuelles subsistent	23
A La chaîne (ou régression) sans fin de von Neumann	26
B Le chat de Schrödinger ; mesures	29
B-1 L'argument	29
B-2 Malentendus	32
B-3 Lien avec le problème de la mesure	34
B-4 Les chats nouvelle vague	35
C L'ami de Wigner	35
D Mesures négatives et "sans interaction"	37
E Une grande variété de points de vue	44
F Des arguments peu convaincants	51
III Le théorème d'Einstein, Podolsky et Rosen	53
A Un théorème	54
B Des pois, des gousses, et de leurs gènes	56
B-1 Une expérience simple ; pas de conclusion à ce stade	56
B-2 Corrélations ; les causes dévoilées	57
C Transposition à la physique	60

C-1	L'argument EPR pour deux particules microscopiques corrélées	60
C-2	La réponse de Bohr	65
C-3	Localité, relativité, séparabilité	69
D	Généralisations	72
D-1	Etats EPR généralisés	72
D-2	L'argument EPR pour des systèmes macroscopiques	76
IV	Le théorème de Bell	79
A	Inégalités de Bell	80
A-1	Mécanique quantique : deux spins dans un état singulet	80
A-2	Réalisme local : démonstration de l'inégalité BCHSH	82
A-3	Contradiction entre l'inégalité et la mécanique quantique	84
A-4	Contenu logique	90
A-5	Contradiction avec les expériences	92
B	Diverses démonstrations du théorème	95
B-1	Autres hypothèses de départ	95
B-2	Généralisations du théorème, théories non déterministes	97
B-3	Statut du théorème ; tentatives de le contourner	111
C	Impact du théorème de Bell, échappatoires	112
C-1	Echappatoires (loopholes), conspirations	113
C-2	La mécanique quantique est-elle non locale ? Contra- factualité	125
V	Autres inégalités, limite de Cirelson, transmission de signaux	129
A	Autres inégalités	130
A-1	Bell 1964	130
A-2	Inégalités de Wigner et d'Espagnat	131
A-3	Inégalité de Mermin	134
A-4	Inégalité de Clauser et Horne	136
A-5	Inégalités de Eberhard	141
A-6	Le jeu de Bell	148
B	Théorème de Cirelson	150
B-1	Mesures sur deux systèmes à deux niveaux	151
B-2	Violation quantique maximale	152
C	Relativité, localité, théorie des champs	154
C-1	Bohr et l'espace-temps	155
C-2	La théorie des champs résoud-elle le problème ?	156
D	Non-transmission instantanée de signaux	157
D-1	Conditions NS de non-transmission instantanée de si- gnaux	158
D-2	Boîtes logiques	159

D-3	Boîte de Popescu-Rohrlich et corrélations “superquantiques”	162
D-4	Comment caractériser la théorie quantique?	164
VI	Autres théorèmes	167
A	Propriétés quantiques des états GHZ	167
A-1	Contradictions GHZ	167
A-2	Inégalité de GHZ-Mermin	172
A-3	Généralisations de GHZ	174
B	Inégalité de Cabello	177
B-1	Réalisme local	178
B-2	Contradiction avec la mécanique quantique	180
C	Impossibilités de Hardy	180
D	Théorème de Bell-Kochen-Specker ; contextualité	184
D-1	Particule de spin 1	185
D-2	Inégalité du pentagramme	187
D-3	Deux particules de spin 1/2, règle du produit	191
D-4	Contextualité et réalisme local	193
E	Réalité du vecteur d’état	194
E-1	ψ ontique ou épistémique?	195
E-2	Théorème PBR	196
E-3	Théorèmes similaires	199
VII	Intrication quantique	203
A	Une notion purement quantique	204
A-1	La partie et le tout	205
A-2	Deux origines possibles des corrélations	208
B	Caractérisations de l’intrication	209
B-1	Ambiguïté de l’intrication	209
B-2	Décomposition de Schmidt d’un état pur	211
B-3	Entropies statistiques	214
B-4	Mesures de l’intrication	215
B-5	Monogamie	216
B-6	Critère de séparabilité pour l’opérateur densité	217
C	Création et perte de l’intrication	218
C-1	Intrication par interactions locales	218
C-2	Echange d’intrication	220
C-3	Décohérence	223
C-4	Purification, distillation	230
D	Dynamique quantique d’un sous-système	231
D-1	Opérateurs de Kraus	231
D-2	Opérateur densité, somme de Kraus	234
D-3	Equation pilote, forme de Lindblad	235

VIII Applications de l'intrication	239
A Deux théorèmes	240
A-1 Non-clonage	240
A-2 Non-détermination d'un état avec une seule réalisation	242
A-3 Conséquences en termes de transmission de signaux . .	243
B Cryptographie quantique	243
B-1 Distribution de clés cryptographiques	244
B-2 Exemples de protocoles d'échange de clés	245
C Téléportation d'un état quantique	251
D Calcul et simulation quantiques	254
D-1 Principe général	255
D-2 Portes quantiques et algorithmes	256
D-3 Codes de correction quantique des erreurs	258
D-4 Simulation quantique	259
IX Mesure quantique	261
A Mesures directes	261
A-1 Mesure idéale, modèle de von Neumann	262
A-2 Effets de l'environnement, états pointeurs	265
A-3 Le paradoxe de Hund	267
A-4 Le théorème WAY (Wigner-Araki-Yanase)	269
B Mesures indirectes	273
B-1 Un modèle simple : système à deux niveaux	274
B-2 Généralisation : POVM	277
C Mesures faibles et continues	279
C-1 Valeurs faibles	279
C-2 Mesures continues	283
X Expériences : la réduction quantique en temps réel	293
A Ion unique dans un piège	294
B Electron unique piégé	298
C Nombre de photons dans une cavité	301
D Phase spontanée de condensats de Bose-Einstein	304
D-1 Interférences dans une région de l'espace	305
D-2 Une variable supplémentaire ?	306
D-3 Non-localité de la phase	308
XI Diverses interprétations et reconstructions de la mécanique quantique	313
A Pragmatisme dans les laboratoires	314
A-1 Interrompre "à la main" la chaîne de von Neumann . .	315
A-2 Interprétation des corrélations	317
A-3 Mettre l'accent sur l'information	322

B	Interprétations statistiques (ensemblistes)	323
C	Interprétation relationnelle, vecteur d'état relatif	326
	C-1 Interprétation relationnelle	326
	C-2 Point de vue informationnel pur	328
D	Approches logiques, algébriques et déductives	331
	D-1 Logique quantique	332
	D-2 Théories algébriques, formelles, et axiomatiques	334
	D-3 Théorème de Gleason	335
E	Le réel voilé	338
F	Réel contextuel quantique	338
G	Histoires cohérentes	339
	G-1 Histoires, familles d'histoires	340
	G-2 Familles cohérentes	342
	G-3 Evolution quantique d'un système isolé	343
	G-4 Incompatibilité des familles différentes	346
	G-5 Comparaison avec d'autres interprétations	346
	G-6 Une profusion d'histoires ; discussion	349
H	Variables supplémentaires ("cachées")	352
	H-1 Théorie de De Broglie-Bohm (dBB)	353
	H-2 Mécanique de Nelson	391
J	Interprétations modale et interactive	392
K	Dynamique de Schrödinger modifiée	396
	K-1 Evolution des idées	397
	K-2 Description de la réalité dans le cadre d'une théorie à dynamique modifiée	410
	K-3 Systèmes quantiques ouverts en mécanique quantique standard	414
	K-4 Dynamique de Schrödinger attractive	415
L	Interprétation transactionnelle	417
M	Interprétation d'Everett	418
	M-1 Aucune limite pour l'équation de Schrödinger	419
	M-2 Développement logique de l'interprétation	421
	M-3 Discussion	427
Conclusion		432
XII Annexe : outils mathématiques de base		435
A	Système physique général	436
	A-1 Espace des états quantiques	436
	A-2 Opérateurs	437
	A-3 Probabilités	440
	A-4 Evolution dans le temps	441
	A-5 Points de vue de Schrödinger et de Heisenberg	442

A-6	Opérateur densité	443
A-7	Un cas simple : le spin $1/2$	447
B	Réunion de plusieurs systèmes physiques	448
B-1	Produit tensoriel	448
B-2	Ensemble de spins $1/2$	450
B-3	Traces partielles	451
C	Particules dans un potentiel	453
C-1	Une seule particule	453
C-2	Spin, expérience de Stern et Gerlach	455
C-3	Plusieurs particules	458

APPENDICES

Appendice A	: Contenu “mental” du vecteur d’état	461
Appendice B	: Inégalités de Bell et théories locales non déterministes	463
Appendice C	: Une tentative pour construire une théorie quantique séparable	469
Appendice D	: Probabilité maximale pour un état parti- culier	473
Appendice E	: Influence d’une sélection des paires observées	475
Appendice F	: Impossibilité d’une transmission superlu- minale de messages	481
Appendice G	: Mesures quantiques à des instants différents	487
Appendice H	: Manipulation des variables supplémentaires	493
Appendice I	: Corrélations et trajectoires en théorie de Bohm	497
Appendice J	: Modèles de réduction spontanée du vecteur d’état	513
Appendice K	: Familles d’histoires cohérentes	519
Appendice L	: Dynamique de Schrödinger attractive	523

BIBLIOGRAPHIE	532
---------------	-----

INDEX	589
-------	-----
