

## De la théorie classique à la physique quantique

<b>1. Du classique au quantique</b>	<b>15</b>
1.1 Lumière et sauts d'énergie	15
1.2 Lumière et matière, même combat	16
<b>2. L'atome</b>	<b>17</b>
<b>3. La classification périodique des éléments</b>	<b>18</b>
<b>4. La lumière</b>	<b>19</b>
4.1 Lumière, onde-corpuscule	19
4.2 Le photon	20

## Modèle de Bohr et quantification de l'énergie

<b>1. Pourquoi le modèle de Bohr ?</b>	<b>21</b>
1.1 Introduction	21
1.2 Spectre électromagnétique et raies spectrales	22
1.3 Postulat de Bohr	23
<b>2. Modèle de Bohr</b>	<b>24</b>

2.1 Précisions concernant les orbites	24
2.2 Modèle de Bohr et nombres quantiques	25
2.2.1 Premier nombre quantique $n$	25
2.2.2 Second nombre quantique $l$	25
2.2.3 Troisième nombre quantique $m$	25
2.2.4 Quatrième nombre quantique $s$	26
2.3 Nombres quantiques et représentation de l'état de l'électron	26

## L'état quantique

<b>1. Vers une définition de l'état quantique</b>	<b>29</b>
1.1 Le principe d'incertitude d'Heisenberg	29
1.2 La mesure quantique	29
1.3 Un monde probabiliste	30
1.4 L'approche systémique	31
<b>2. L'état quantique et les mathématiques</b>	<b>31</b>
2.1 Rapide retour sur les vecteurs	31
2.2 Rapide retour sur le calcul matriciel	33
2.3 La notation bra-ket	35
<b>3. Fonction d'onde</b>	<b>37</b>

3.1 La mise en évidence graphique	37
3.2 La fonction d'onde continue	38

## La superposition quantique

<b>1. Introduction à la superposition quantique</b>	<b>39</b>
1.1 En partant de l'état quantique	39
1.2 Outils mathématiques	39
1.2.1 Premier exemple avec le spin de l'électron	40
1.2.2 Rapide retour sur les nombres complexes	40
1.2.3 Calcul relatif à la probabilité	41
1.3 Second exemple : le « dé quantique »	42
<b>2. Interprétation de la superposition quantique</b>	<b>42</b>
2.1 Interprétation du « dé quantique »	42
2.2 Le paradoxe du chat de Schrödinger	43
2.2.1 Mise en équation	43
2.3 Le congrès Solvay de 1927	44
2.4 Théorie d'Everett	45
<b>3. Vérification de la superposition quantique</b>	<b>46</b>

## L'intrication quantique

<b>1. Première approche de l'intrication quantique</b>	<b>47</b>
1.1 Propos introductif	47
1.2 Mise en évidence	48
<b>2. Le paradoxe EPR</b>	<b>49</b>
2.1 Explications du paradoxe EPR	49
2.2 Interprétations du paradoxe EPR	50
<b>3. La théorie de Bell</b>	<b>50</b>
3.1 Explications de la théorie de Bell	50
3.2 Intérêt des inégalités de Bell dans le champ expérimental	51
3.3 « Dieu joue aux dés » (?) ou l'expérience d'Aspect	51

## Le bit quantique

<b>1. Vers le bit quantique</b>	<b>53</b>
1.1 Du bit au bit quantique	53
1.2 Sphère de Bloch	54
1.3 Résumé du cycle de vie d'un qubit	56

<b>2. Définition vectorielle du bit quantique</b>	<b>57</b>
2.1 Exemple à un qubit	57
2.2 Exemple à deux qubits	57

## La porte quantique

<b>1. Comparaison avec l'informatique quantique</b>	<b>59</b>
1.1 Introduction	59
1.2 Exemple de la porte logique NOT	60
1.3 Exemple de la porte logique XOR	61
<b>2. Les portes quantiques à un qubit en entrée</b>	<b>62</b>
2.1 Introduction	62
2.2 Porte de Hadamard (H)	63
2.2.1 Utilisation de la porte de Hadamard	64
2.3 Porte de Pauli-X (NOT)	65
2.3.1 Utilisation de la porte de Pauli-X	66
2.4 Portes de Pauli-Y et de Pauli-Z	66
2.4.1 Considérations sur la porte de Pauli-Y	67
2.4.2 Considérations sur la porte de Pauli-Z	67
2.5 Racine carrée de la porte NOT	67

2.6 Porte de changement de phase	68
	68
<b>3. Les portes quantiques à deux qubits en entrée</b>	<b>69</b>
3.1 Introduction	69
3.2 Porte cNOT (cX)	69
3.3 Porte SWAP (S)	71
3.3.1 Présentation et description	71
3.3.2 Conception de la porte SWAT à base de la porte cNOT	72
	72
<b>4. Les portes quantiques à trois qubits en entrée</b>	<b>72</b>
4.1 Porte TOF (CCNOT)	72
4.2 Porte Fredkin (CSWAP)	74
4.3 La mesure dans les schémas quantiques	75
	75
Définition des circuits quantiques	
<b>1. Introduction</b>	<b>77</b>
<b>2. Produit tensoriel</b>	<b>78</b>
2.1 Montage en série	78
2.2 Produit de Kronecker	79
2.3 Montage en parallèle	79

	80
<b>3. Les états de Bell</b>	<b>81</b>
3.1 Explications	81
3.2 Initialisation	82
3.3 Application de la porte de Hadamard	82
3.4 Application de la porte CNOT	82
3.5 Résultat et interprétation	83
<b>4. Téléportation quantique</b>	<b>84</b>
4.1 Explications	84
4.2 Scénario de téléportation	84
4.3 Schéma quantique de téléportation	85
4.4 Interprétation	85
<b>5. Classification des problèmes à résoudre et complexité</b>	<b>86</b>
5.1 L'informatique classique face à l'informatique quantique	86
5.1.1 Complexité des problèmes à résoudre	86
5.1.2 Parallélisation quantique ou la puissance du registre quantique	86
<b>6. Typologie des problèmes</b>	<b>88</b>
6.1 Contexte	88
6.2 La complexité	88

6.2.1 Première approche	88
6.2.2 Complexité de l'algorithme par dichotomie	88
6.2.3 Complexité d'un algorithme appliqué au problème du voyageur de commerce	89
6.3 Catégorisation des problèmes	90
6.3.1 Les classes P et NP	93
6.3.2 Inclusions ?	93
6.3.3 Les classes EXPTIME et NEXPTIME	93
6.3.4 La classe NP-Complet	94
<b>7. Vers la suprématie quantique ?</b>	<b>95</b>
7.1 Introduction	95
7.2 L'algorithme quantique de Shor	96
Construire un ordinateur quantique	
<b>1. Introduction</b>	<b>97</b>
<b>2. Architecture de l'ordinateur quantique</b>	<b>98</b>
2.1 Premiers éléments	98
2.2 Bit quantique logique et bit quantique physique	99
<b>3. Le bit quantique physique en pratique</b>	<b>99</b>



3.1 Approche générale	99
3.2 Pistes de réalisation	100
<b>4. Détails de quelques pistes de réalisation</b>	<b>101</b>
4.1 La piste de la résonance magnétique nucléaire	101
4.1.1 Explication du phénomène	101
4.1.2 RMN et ordinateur quantique	101
4.2 La piste « Josephson »	101
4.2.1 L'effet Josephson	101
4.2.2 Bit quantique à supraconducteurs	102
<b>5. Un bref état des lieux</b>	<b>102</b>
5.1 Typologie des acteurs	102
5.2 Un état des lieux, acteur par acteur	103
5.2.1 D-Wave Systems	103
5.2.2 Rigetti Computing	104
5.2.3 Fujitsu	105
5.2.4 Atos	105
5.2.5 Google	105
5.2.6 Intel	105
5.2.7 IBM	106

5.2.8 Microsoft	106
-----------------	-----

## Quantum Development Kit et son installation

<b>1. Présentation générale</b>	<b>107</b>
1.1 Annonce de la sortie	107
1.2 Composition du kit quantique de Microsoft	108
<b>2. Installation du Microsoft Quantum Development Kit</b>	<b>109</b>
2.1 Environnements de développements ciblés	109
2.2 Installation avec Microsoft Visual Studio	109
2.2.1 Installation de Microsoft Visual Studio	110
2.2.2 Installation de Microsoft Quantum Development Kit	111
2.3 Installation avec Visual Studio Code	111
2.3.1 Installation de Visual Studio Code	111
2.3.2 Installation du .NET Core SDK	112
2.3.3 Installation annexe relative à C# (facultative)	112
2.3.4 Installation de Microsoft Quantum Development Kit	115
2.3.5 Configuration relative à la ligne de commande	115
2.4 Test de la validité de l'installation	116
2.4.1 Test avec Microsoft Visual Studio	117
2.4.2 Test avec Visual Studio Code	117

2.5 Examen du projet de test de téléportation	118
2.5.1 Le projet de téléportation	120
2.5.2 Le fichier TeleportationSample.qs	122

## Le langage Q# et son utilisation

<b>1. Présentation du langage Q#</b>	<b>127</b>
1.1 Introduction	127
1.2 Un langage évolutif	127
1.3 Un langage multiparadigme	128
<b>2. Éléments relatifs aux signes de ponctuation</b>	<b>128</b>
2.1 Contexte	128
2.2 Nomenclature relative aux signes de ponctuation	129
<b>3. Les types en Q#</b>	<b>129</b>
3.1 Les types primitifs du langage	129
<b>4. Les structures de données</b>	<b>131</b>
4.1 Introduction	131
4.2 Le tableau	131

4.3 Le tuple	132
4.3.1 Le cas particulier du tuple singleton	132
<b>5. Considérations sur les types et les structures de données en Q#</b>	<b>133</b>
5.1 Définir ses propres types en Q#	133
5.2 Les types encapsulés en Q#	134
5.2.1 Introduction du mot-clé let	134
5.2.2 Utiliser les types encapsulés	134
5.2.3 Opérateur de désencapsulation	135
<b>6. Opérations et fonctions Q#</b>	<b>136</b>
6.1 Distinction entre opération et fonction en Q#	136
6.2 Utiliser des « callables » dans des « callables »	136
6.3 L'opération en Q#	137
6.3.1 Première approche	137
6.3.2 Un exemple avec tuple non vide en sortie	138
6.3.3 Les mots-clés adjoint et controlled	139
6.4 La fonction en Q#	140
6.5 Conditions, boucles, etc.	140
6.5.1 Condition if...elif	140
6.5.2 Boucle for	141
6.5.3 Boucle repeat...until	141

	141
<b>7. Les variables en Q#</b>	<b>142</b>
7.1 Le mot-clé let et l'immuabilité	142
7.2 Les mots-clés mutable et set	142
<b>8. Manipuler des bits quantiques en Q#</b>	<b>143</b>
8.1 Utiliser un registre de bits quantiques	143
8.2 Première approche des portes quantiques en Q#	143
8.2.1 Les primitives en Q#	143
8.2.2 Une primitive particulière, la mesure	145
8.3 Inventaire des primitives en Q#	145
8.3.1 Opération Assert	145
8.3.2 Opération AssertProb	146
8.3.3 Opération CNOT	146
8.3.4 Opération CCNOT	147
8.3.5 Opération Exp	148
8.3.6 Opération ExpFrac	148
8.3.7 Opération H	149
8.3.8 Opération I	149
8.3.9 Opération M	149
8.3.10 Opération Measure	150

8.3.11 Opération MultiX	150
8.3.12 Opération R	151
8.3.13 Opération R1	152
8.3.14 Opération R1Frac	153
8.3.15 Opération RFrac	153
8.3.16 Opération Rx	153
8.3.17 Opération Ry	154
8.3.18 Opération Rz	154
8.3.19 Opération Random	155
8.3.20 Opération Reset	155
8.3.21 Opération ResetAll	155
8.3.22 Opération S	156
8.3.23 Opération SWAP	156
8.3.24 Opération T	157
8.3.25 Opération X	157
8.3.26 Opération Y	158
8.3.27 Opération Z	158
<b>9. Tester son code quantique et le déboguer</b>	<b>158</b>
9.1 Les tests unitaires en Q#	158
9.1.1 Contexte	158

9.1.2	Création d'un projet de tests avec Microsoft Visual Studio	159
9.1.3	Création d'un projet de tests avec Visual Studio Code	159
9.1.4	Écrire des tests unitaires	159
9.1.5	Exécuter des tests unitaires	160
9.2	Déboguer un code quantique Q#	162
9.2.1	Les outils des environnements de développement	162
9.2.2	Utiliser les messages	162
9.2.3	Utiliser les logs	163
9.2.4	Utiliser les assertions	163
9.2.5	Les fonctions de dump	164
<b>10.</b>	<b>Inventaire des espaces de noms quantiques</b>	<b>166</b>
10.1	Contexte	166
10.2	L'espace de noms Microsoft.Quantum.Core	166
10.3	Les espaces Microsoft.Extensions.*	167
10.3.1	Microsoft.Extensions.Bitwise	167
10.3.2	Microsoft.Extensions.Convert	168
10.3.3	Microsoft.Extensions.Diagnostics	168
10.3.4	Microsoft.Extensions.Math	169
10.3.5	Microsoft.Extensions.Testing	169
10.4	L'espace Microsoft.Quantum.Primitive	169

10.5 L'espace Microsoft.Quantum.Canon	170
<b>11. C# en pilotage du simulateur quantique</b>	<b>170</b>
Simuler des programmes quantiques en Q#	
<b>1. Contexte</b>	<b>175</b>
<b>2. Exemple appliqué : les états de Bell</b>	<b>175</b>
2.1 Contexte	175
2.2 Les états de Bell	176
2.3 Création d'un projet quantique	177
2.3.1 Création d'un projet quantique avec Microsoft Visual Studio	177
2.3.2 Création d'un projet quantique avec Visual Studio Code	177
2.4 Programmation du fichier Q#	178
2.4.1 Renommage du fichier	178
2.4.2 Codage du fichier Q#	178
2.5 Programmation du fichier de pilotage C#	182
2.5.1 Code automatiquement généré	182
2.6 Exécuter le programme quantique	184
2.6.1 Exécuter le programme quantique avec Microsoft Visual Studio	184
2.6.2 Exécuter le programme quantique avec Visual Studio Code	184



2.7 Simuler la superposition quantique	184
2.8 Simuler les états de Bell avec l'intrication quantique	185
	188
<b>3. Plus loin dans le développement Q#</b>	<b>192</b>
3.1 Différentes situations de mesures en Q#	192
3.1.1 Contexte	192
3.1.2 Le projet quantique de mesure	192
3.1.3 Le pilote C#	193
3.1.4 Le code quantique Q# de la mesure d'un bit quantique	195
3.1.5 Le code quantique Q# de la mesure d'un registre de bits quantiques	196
3.1.6 Le code quantique Q# de la mesure dans la base de Bell	197
3.2 Algorithme quantique de Deutsch-Jozsa	199
3.2.1 Contexte	199
3.2.2 L'algorithme quantique	200
3.2.3 Le pilote C#	200
3.2.4 Le code quantique Q#	202
<b>4. Simulateur quantique : en local ou dans le cloud ?</b>	<b>204</b>
4.1 Contexte	204
4.2 Simulateur distant avec Azure	205

## Histoire de la physique quantique

<b>1. Contexte</b>	<b>207</b>
<b>2. Histoire chronologique : le XIXe siècle</b>	<b>208</b>
2.1 De 1800 aux années 1860	208
2.2 Années 1870	208
2.3 Années 1880	209
2.4 Années 1890	209
<b>3. Histoire chronologique : le XXe siècle</b>	<b>210</b>
3.1 Années 1900	210
3.2 Années 1910	211
3.3 Années 1920	211
3.3.1 Année 1922	211
3.3.2 Année 1923	212
3.3.3 Année 1925	212
3.3.4 Année 1926	212
3.3.5 Année 1927	213
3.3.6 Année 1928	213
3.3.7 Année 1929	214
3.4 Années 1930	214

3.5 Années 1940	215
3.6 Années 1950	215
3.7 Années 1960	215
3.8 Années 1970	216
3.9 Années 1980	216
3.10 Années 1990	217
<b>4. Histoire chronologique : le XXIe siècle</b>	<b>218</b>
4.1 Années 2000	218
4.2 Années 2010	218
Glossaire de la physique quantique	
<b>1. Contexte</b>	<b>219</b>
<b>2. Glossaire alphabétique</b>	<b>220</b>
<b>Index</b>	<b>231</b>