

# Table des matières

Avant-propos	iii
Coordinateurs, contributeurs, mécènes et remerciements	v
Préface	xv
<b>1 Refroidir et piéger les atomes</b>	<b>1</b>
1.1 Quand un atome rencontre un photon . . . . .	2
1.1.1 L'atome ralentit... . . . . .	3
1.1.2 ... la température du gaz s'abaisse . . . . .	5
1.2 Des pièges de toutes sortes pour les atomes . . . . .	7
1.2.1 Avec un laser et des champs magnétiques : le piège à tout faire . . . . .	8
1.2.2 Des pinces optiques pour attraper et immobiliser les atomes	10
1.2.3 Avec des champs magnétiques : pièges de grand volume ou puces à atomes . . . . .	13
1.3 Encore plus froid : le gaz change d'état . . . . .	16
1.3.1 En marche vers le zéro absolu, dernière étape : on évapore .	16
1.3.2 Le Graal enfin, la condensation de Bose-Einstein : les atomes tous comme un seul ! . . . . .	17
1.3.3 Des boîtes à atomes faites de lumière . . . . .	21
1.3.4 Les atomes peuvent s'attirer ou se repousser . . . . .	22
1.4 Et toute la jungle des particules à l'échelle microscopique . . . . .	23
1.4.1 De quoi la matière est-elle faite ? Bosons et fermions . . . . .	23
1.4.2 Les fermions aussi peuvent devenir ultrafroids . . . . .	24
1.5 Conclusion . . . . .	26
<b>2 Instruments à atomes froids et métrologie</b>	<b>27</b>
2.1 Qu'est-ce que la métrologie ? . . . . .	28
2.1.1 Notion d'incertitude statistique et systématique . . . . .	28
2.1.2 Les atomes comme étalons . . . . .	28
2.1.3 Métrologie avec des systèmes quantiques . . . . .	29
2.2 Horloges atomiques . . . . .	30

2.2.1	Principe d'une horloge atomique . . . . .	30
2.2.2	Pourquoi utiliser des atomes froids ? . . . . .	32
2.2.3	Les horloges à atomes froids de césium . . . . .	32
2.2.4	Le piégeage des atomes pour améliorer la précision . . . . .	34
2.2.5	Les horloges optiques et la future définition de la seconde . . . . .	34
2.2.6	Les liens entre les horloges et les échelles de temps . . . . .	36
2.3	Interféromètres atomiques . . . . .	36
2.3.1	Principe d'un interféromètre atomique, similarités et différences avec une horloge au césium . . . . .	36
2.3.2	Capteurs inertiels avec des interféromètres atomiques . . . . .	39
2.3.3	Maturité des instruments et transferts industriels . . . . .	42
2.3.4	Nouvelles architectures . . . . .	43
2.4	Sonder les lois fondamentales de la physique avec des atomes froids . . . . .	44
2.4.1	Gravimétrie et chrono-géodésie . . . . .	45
2.4.2	Relativité générale et ondes gravitationnelles . . . . .	47
2.4.3	Modèle standard et matière noire . . . . .	49
<b>3</b>	<b>Atomes et photons uniques : échange d'information quantique</b>	<b>51</b>
3.1	Voir un atome unique . . . . .	51
3.2	L'apport des cavités . . . . .	55
3.3	Couplage fort entre un photon et un atome : le doublet de Rabi . . . . .	57
3.4	L'atome comme qubit . . . . .	58
3.5	Des cavités miniaturisées . . . . .	60
3.6	Détecter l'état d'un qubit . . . . .	62
3.7	Stocker de l'information quantique dans des atomes froids : Mémoires quantiques . . . . .	64
3.8	Améliorer les horloges grâce à l'intrication : états comprimés de spin . . . . .	68
<b>4</b>	<b>La simulation quantique avec des atomes froids</b>	<b>75</b>
4.1	Qu'est-ce que la simulation quantique ? . . . . .	76
4.1.1	De la matière classique aux constituants quantiques . . . . .	76
4.1.2	Des difficultés insurmontables pour comprendre les systèmes quantiques complexes ? . . . . .	78
4.2	Atomes ultrafroids et simulation quantique . . . . .	81
4.2.1	Les gaz ultrafroids : des systèmes dilués où surgissent des comportements collectifs complexes . . . . .	81
4.2.2	Pourquoi les atomes froids sont-ils de bons simulateurs quantiques ? . . . . .	84
4.3	Voir un système quantique atome par atome . . . . .	88

4.3.1	Visualiser des atomes dans un réseau optique . . . . .	88
4.3.2	Assembler des cristaux artificiels atome par atome . . . . .	89
4.4	Que peut-on simuler avec des atomes froids ? . . . . .	90
4.4.1	Simuler le magnétisme quantique . . . . .	90
4.4.2	Poursuivre les recherches sur l'origine de la supraconductivité . . . . .	93
4.4.3	Améliorer la compréhension de la physique des matériaux fortement corrélés . . . . .	93
4.4.4	Beaucoup d'autres perspectives . . . . .	95
<b>5</b>	<b>Ondes et désordre</b>	<b>97</b>
5.1	Ondes et désordre : une physique très riche ! . . . . .	98
5.1.1	La diffusion : une approche intuitive... . . . . .	98
5.1.2	... qui cache une physique bien plus complexe ! . . . . .	99
5.1.3	Une physique source d'innovation . . . . .	99
5.2	Atomes froids : le désordre, oui, mais contrôlé ! . . . . .	100
5.2.1	Comment immerger les atomes dans le désordre ? . . . . .	100
5.2.2	Marche aléatoire d'atomes froids dans le désordre : la diffusion . . . . .	102
5.3	La localisation d'Anderson : stoppé net par le désordre . . . . .	104
5.3.1	60 ans de localisation d'Anderson et toujours des questions . . . . .	104
5.3.2	Comprendre intuitivement la localisation d'Anderson . . . . .	107
5.3.3	La localisation d'Anderson des atomes froids : les premières observations . . . . .	109
5.3.4	Vers l'étude de la transition d'Anderson à 3D . . . . .	111
5.4	La rétro-diffusion cohérente : visualiser les interférences . . . . .	114
5.4.1	La localisation dans l'espace des vitesses . . . . .	114
5.4.2	La rétro-diffusion cohérente des atomes froids . . . . .	115
5.4.3	La localisation d'Anderson dans l'espace des vitesses . . . . .	118
5.5	Atomes froids et désordre : d'autres configurations . . . . .	118
5.5.1	Universalité des phénomènes de localisation . . . . .	118
5.5.2	Diffusion de la lumière par les atomes . . . . .	119
5.5.3	« Frapper » les atomes pour les localiser . . . . .	122
5.6	Interactions et désordre : quand les atomes se parlent . . . . .	125
5.6.1	Phases quantiques des gaz désordonnés à basse température . . . . .	125
5.6.2	La localisation à $N$ -corps : quand le désordre rend impossible le retour à l'équilibre . . . . .	127
5.7	Conclusion . . . . .	129

<b>6 Ions piégés et refroidis</b>	<b>131</b>
6.1 Comment confiner une particule chargée ? . . . . .	133
6.1.1 Le piège de Penning . . . . .	134
6.1.2 Le piège radiofréquence, ou piège de Paul . . . . .	135
6.1.3 Zoologie des pièges . . . . .	137
6.2 Comment refroidir les ions piégés ? . . . . .	139
6.3 Mettons plusieurs ions dans le piège ! . . . . .	142
6.4 Que faire avec des ions piégés ? . . . . .	143
6.4.1 Des mesures de précision : masses, propriétés atomiques, ...	144
6.4.2 Régime de confinement fort et horloges à ions . . . . .	145
6.4.3 Information et simulation quantiques . . . . .	147
6.4.4 Collisions et réactions chimiques froides . . . . .	148
6.4.5 Confiner l'antimatière . . . . .	148
6.5 Conclusion . . . . .	149
<b>7 Refroidir les molécules</b>	<b>151</b>
7.1 Comment caractériser une molécule ? . . . . .	154
7.1.1 Les niveaux d'énergie électroniques, vibrationnels, rotationnels . . . . .	154
7.1.2 Peut-on refroidir des molécules par laser ? . . . . .	156
7.2 Associer des atomes froids . . . . .	159
7.2.1 Avec un photon : la photo-association . . . . .	159
7.2.2 Avec un champ magnétique : la magnéto-association . . . . .	160
7.2.3 Comment contrôler l'association ? . . . . .	161
7.3 Refroidir directement des molécules . . . . .	163
7.3.1 Formation et refroidissement préliminaire . . . . .	164
7.3.2 Décélération des jets moléculaires . . . . .	166
7.3.3 Refroidissement sub-Kelvin . . . . .	168
7.4 Les molécules froides : pour quelles applications ? . . . . .	170
7.4.1 Simulation quantique . . . . .	172
7.4.2 Information quantique . . . . .	174
7.4.3 Chimie moléculaire froide et contrôlée . . . . .	175
7.4.4 Mesures de précision . . . . .	177
7.5 Conclusion . . . . .	179
<b>8 Conclusion et tout ce dont ce livre aurait pu aussi parler . . .</b>	<b>181</b>
<b>Index</b>	<b>193</b>