

Table des matières

Introduction	9
Lexique	13
1 Description statistique des grands systèmes	17
1.1 Évolution classique ou quantique d'une particule	18
1.1.1 Évolution classique	18
1.1.2 Évolution quantique	19
1.1.3 Principe d'incertitude et espace des phases	20
1.1.4 Autres degrés de liberté	21
1.2 Systèmes macroscopiques ; densité de probabilité	21
1.2.1 Nécessité d'une approche statistique des systèmes macroscopiques	21
1.2.2 Densité de probabilité classique	23
1.2.3 Opérateur densité en Mécanique Quantique	25
1.3 Hypothèses statistiques ; équiprobabilité	26
1.3.1 Microétat, macroétat	26
1.3.2 Moyenne dans le temps et moyenne d'ensemble	27
1.3.3 Équiprobabilité	28
1.4 Propriétés générales de l'entropie statistique	30
1.4.1 Définition de Boltzmann	30
1.4.2 Définition de Gibbs	30
1.4.3 Définition de Shannon	32
2 Les différents ensembles statistiques	47
2.1 États d'énergie d'un système à N particules	48
2.2 Système isolé à l'équilibre, « ensemble microcanonique »	51
2.3 Conditions d'équilibre entre deux systèmes en contact	52
2.3.1 Condition d'équilibre : égalité des paramètres β	52
2.3.2 Fluctuations de l'énergie autour de la valeur la plus probable, pour deux systèmes macroscopiques couplés	53

2.4	Système en contact avec un thermostat	56
2.4.1	Facteur de Boltzmann	57
2.4.2	Énergie d'un système donnée en moyenne	58
2.4.3	Fonction de partition Z	59
2.4.4	Entropie dans l'ensemble canonique	61
2.4.5	Fonction de partition d'un ensemble de deux systèmes indépendants de même paramètre β (même T)	62
2.5	Échange d'énergie et de particules	64
2.5.1	Condition d'équilibre : égalité des températures et des potentiels chimiques	65
2.5.2	Thermostat réservoir de particules ; probabilité et fonction de partition grand-canoniques	66
2.5.3	Loi de probabilité, fonction de partition grand-canonique	67
2.5.4	Valeurs moyennes	67
2.5.5	Entropie grand-canonique	68
2.6	Autres ensembles statistiques	69
3	Thermodynamique et Physique Statistique	75
3.1	Principe zéro de la Thermodynamique	76
3.2	Premier principe de la Thermodynamique	76
3.2.1	Travail	77
3.2.2	Chaleur	78
3.2.3	Transformation quasi-statique générale	79
3.3	Second principe de la Thermodynamique	80
3.4	Troisième principe ou principe de Nernst	82
3.5	Les potentiels thermodynamiques	83
3.5.1	Système isolé	83
3.5.2	Système en contact avec un thermostat à la température T , à nombre de particules fixé	85
3.5.3	Système en contact avec un autre agissant comme thermostat à la température T et réservoir de particules	86
3.5.4	Transformations de Legendre ; autres potentiels thermodynamiques	88
4	Le gaz parfait	95
4.1	Introduction	95
4.2	Approche cinétique	96
4.2.1	Section efficace, libre parcours moyen	96
4.2.2	Calcul cinétique de la pression	97
4.3	Statistique classique ou statistique quantique ?	99
4.4	Traitement statistique classique du gaz parfait	101

4.4.1	Calcul de la fonction de partition canonique	101
4.4.2	Énergie moyenne ; équipartition de l'énergie	103
4.4.3	Énergie libre ; grandeurs physiques (P, S, μ)	105
4.4.4	Paradoxe de Gibbs	106
4.5	Conclusion	107
5	Indiscernabilité, principe de Pauli	131
5.1	Introduction	132
5.2	États de deux particules indiscernables	134
5.2.1	Cas général	134
5.2.2	Particules indépendantes	134
5.3	Principe de Pauli ; connexion spin-statistique	137
5.3.1	Principe de Pauli ; Principe d'exclusion de Pauli	137
5.3.2	Théorème de connexion entre spin et statistique	138
5.4	Cas particulier de deux particules de spin $1/2$	139
5.4.1	États de spin triplet et singulet	139
5.4.2	Propriétés générales de la fonction d'onde de deux particules de spin $1/2$	141
5.5	Cas particulier de particules indépendantes en nombre N	141
5.5.1	Fonction d'onde	142
5.5.2	Nombre d'occupation	142
5.6	Retour sur les exemples de l'introduction	143
5.6.1	Propriétés de fermions	144
5.6.2	Propriétés de bosons	144
6	Généralités sur les statistiques quantiques	147
6.1	Utilisation de l'ensemble grand-canonique	148
6.1.1	Deux particules indiscernables à l'équilibre à la température T : description statistique dans l'ensemble canonique	148
6.1.2	Description dans l'ensemble grand-canonique	149
6.2	Factorisation de la grande fonction de partition	150
6.2.1	Fermions et bosons	150
6.2.2	Fermions	151
6.2.3	Bosons	151
6.2.4	Potentiel chimique et nombre de particules	152
6.3	Nombre moyen d'occupation ; grand-potentiel	152
6.4	Particule libre dans une boîte ; densité d'états	153
6.4.1	États quantiques d'une particule libre dans une boîte	154
6.4.2	Densité d'états	158
6.5	Facteur de Fermi-Dirac ; facteur de Bose-Einstein	163
6.6	Valeurs moyennes de grandeurs physiques à T	164

6.7	Limite commune des statistiques quantiques	164
6.7.1	Potentiel chimique du gaz parfait	164
6.7.2	Fonction de partition grand-canonique du gaz parfait	167
7	Fermions à basse température	171
7.1	Propriétés des fermions à température nulle	171
7.1.1	Facteur de Fermi, énergie de Fermi	171
7.1.2	Énergie interne et pression d'un gaz de Fermi à température nulle	174
7.1.3	Propriétés magnétiques. Paramagnétisme de Pauli	175
7.2	Propriétés des fermions à température non nulle	176
7.2.1	Régimes de température et comportement du potentiel chimique	176
7.2.2	Chaleur spécifique (ou capacité calorifique) des fermions	179
7.2.3	Émission thermionique	181
8	Notions sur la théorie des bandes	191
8.1	Qu'est-ce qu'un solide, qu'un cristal?	192
8.2	Recherche des états stationnaires	193
8.2.1	Rappel : le double puits de potentiel	193
8.2.2	Électron sur une chaîne infinie et périodique	196
8.2.3	Bandes d'énergie et fonctions de Bloch	198
8.3	Les états d'un électron dans un cristal	200
8.3.1	Paquet d'ondes de Bloch	200
8.3.2	Résistance ; libre parcours	201
8.3.3	Chaîne de dimension finie, densité d'états, masse effective	201
8.4	Physique statistique des solides	205
8.4.1	Remplissage des niveaux	205
8.4.2	Comportement de la conductivité des métaux en fonction de la température	206
8.4.3	Comportement des isolants en fonction de la température ; semi-conducteurs	207
8.5	Exemples de dispositifs à semi-conducteurs	212
8.5.1	La photocopieuse : photoconductivité	212
8.5.2	La cellule solaire : jonction $p - n$ éclairée	212
8.5.3	Lecteurs de disques compacts : les puits quantiques à semi-conducteurs	212
9	Bosons : hélium 4, photons, rayonnement thermique	217
9.1	Particules matérielles	217
9.1.1	Thermodynamique du gaz de bosons	217
9.1.2	Condensation de Bose	219
9.2	Distribution de Bose-Einstein des photons	221

9.2.1	Description du rayonnement thermique ; les photons	222
9.2.2	Statistique des photons, bosons en nombre non conservé	223
9.2.3	Définition et spectre du corps noir	226
9.2.4	Interprétation de la loi de Planck	227
9.2.5	Mesures photométriques : définitions	230
9.2.6	Bilans radiatifs	233
9.2.7	Effet de serre	234
Méthode générale de résolution des exercices et problèmes de physique statistique		239
Unités et constantes physiques		241
Quelques formules utiles		245
Contrôles antérieurs		247
Corrigés des contrôles antérieurs		267