Table des matières

Chapitre 1
Variables aléatoires et processus aléatoires 1
1 Variables aléatoires, moments et fonction caractéristique 2
2 Distributions à plusieurs variables 4
3 Addition de variables aléatoires 7
4 Distributions gaussiennes 8
5 Théorème de la limite centrale 10
6 Processus aléatoires 13
7 Stationnarité et ergodicité 16
8 Les processus aléatoires en physique :
l'exemple du mouvement brownien 17
9 Analyse harmonique des processus aléatoires stationnaires 18
10 Théorème de Wiener-Khintchine 21
Appendice du chapitre 1
Autre démonstration du théorème de Wiener-Khintchine 25
Bibliographie 27
Références 27

Chapitre 2
Thermodynamique linéaire des processus irréversibles 29
1 Quelques rappels de thermodynamique à l'équilibre 30
2 Description des processus irréversibles : affinités et flux 31
3 L'hypothèse de l'équilibre local 34
4 Affinités et flux dans un milieu continu en équilibre local 36
5 Réponse linéaire 40
6 Quelques exemples simples de coefficients de transport 41
7 Principe de Curie 46
8 Relations de réciprocité 47
9 Justification des relations de réciprocité 49
10 Théorème du minimum de la production d'entropie 52
Bibliographie 54
Références 54

Complément 2.A
Fluctuations thermodynamiques 55
1 Les fluctuations 55
2 Conséquences du principe de maximum de l'entropie 56
3 Probabilité d'une fluctuation : formule d'Einstein 57
4 Fluctuations à l'équilibre dans un fluide de N molécules 58
Bibliographie 62
Références 62

Complément 2.B
Effets thermoélectriques 63
1 Introduction 63
2 Flux de particules et flux de chaleur. Source d'entropie 64
3 Conduction électrique isotherme 65
4 Conduction thermique en circuit ouvert 66
5 Effet Seebeck 66
6 Effet Peltier 68
7 Effet Thomson 69
8 Illustration du théorème du minimum de la production d'entropie . . 70
Bibliographie 72

Complément 2.C
Thermodiffusion dans un mélange fluide 73
1 Introduction 73
2 Flux diffusifs dans un mélange binaire 73
3 Source d'entropie 74
4 Relations linéaires entre les flux et les affinités 75
5 Effet Soret. Effet Dufour 77
Bibliographie 78
Références 78

Chapitre 3
Description statistique des systèmes hors d'équilibre 79
1 Fonction de distribution dans l'espace des phases 80
2 Opérateur densité 84
3 Systèmes à l'équilibre 87
4 Évolution des variables macroscopiques : cas classique 89
5 Évolution des variables macroscopiques : cas quantique 91
Bibliographie 93
Références 93

Chapitre 4
Systèmes classiques. Fonctions de distribution réduites 95
1 Systèmes de particules classiques avec des interactions de paire 96
2 Équation de Liouville 97

3 Fonctions de distribution réduites. Hiérarchie BBGKY 99
4 Équation de Vlasov 103
5 Invariance de jauge 104
Appendices du chapitre 4
A1 Potentiels d'interaction de paire 106
A2 Équations de Hamilton d'une particule chargée 107
A3 Invariance de jauge de l'équation de Liouville 109
Bibliographie 111
Références 111

Chapitre 5
Équation de Boltzmann 113
1 Description statistique des gaz classiques dilués 114
2 Échelles de temps et de longueur 115
3 Notations et définitions 116
4 Évolution de la fonction de distribution 117
5 Les collisions binaires 119
6 L'équation de Boltzmann 121
7 Irréversibilité 125
8 Théorème H 126
9 Distributions d'équilibre 129
10 Équilibre global 130
11 Équilibre local 132
Bibliographie 134
Références 134

Complément 5.A
Gaz de Lorentz 136
1 Gaz en présence de centres diffuseurs fixes 136
2 Échelles de temps 136
3 Les collisions sur les diffuseurs fixes 137
4 L'équation cinétique du gaz de Lorentz 137
Bibliographie 141
Références 141

Complément 5.B
Les paradoxes de l'irréversibilité 142
1 Les paradoxes 142
2 Paradoxe du renversement du temps 142
3 Paradoxe de la récurrence 143
Bibliographie 145
Références 145

Chapitre 6
Coefficients de transport 147
1 Approximation du temps de relaxation 148
2 Linéarisation par rapport aux perturbations extérieures 150
3 Coefficients cinétiques 151
4 Conductivité électrique 154
5 Coefficient de diffusion 157
Bibliographie 160
Références 160

Complément 6.A
Amortissement de Landau 161
1 Plasma faiblement couplé 161
2 Les équations de Vlasov pour un plasma sans collisions 161
3 Conductivité et permittivité diélectrique d'un plasma sans collisions 164
4 Ondes longitudinales dans un plasma maxwellien 168
Bibliographie 171

Chapitre 7
De l'équation de Boltzmann aux équations hydrodynamiques . 173
1 Régime hydrodynamique 174
2 Équations de bilan local 176
3 Développement de Chapman-Enskog 180
4 Approximation d'ordre zéro 182
5 Approximation d'ordre un 184
Appendices du chapitre 7
A1 Propriété de l'intégrale de collision 189
A2 Loi de Newton. Coefficient de viscosité 190
Bibliographie 194

Chapitre 8
Théorie de Bloch-Boltzmann du transport électronique 195
1 Équation de Boltzmann pour le gaz d'électrons 196
2 L'intégrale de collision de l'équation de Boltzmann 198
3 L'équilibre détaillé 202
4 Approximation du temps de relaxation. Linéarisation 203
5 Conductivité électrique 204
6 Transport semi-classique en présence de champ magnétique 207
7 Limites de validité de la théorie de Bloch-Boltzmann 213
Bibliographie 215
Références 215

Complément 8.A
Processus de collision 216
1 Introduction 216

2 Diffusion des électrons par les impuretés 216
3 Diffusion des électrons par les phonons 223
Bibliographie 227
Références 227

Complément 8.B
Coefficients thermoélectriques 228
1 Flux de particules et flux de chaleur 228
2 Expression générale des coefficients cinétiques 229
3 Conductivité thermique 229
4 Coefficient Seebeck. Coefficient Peltier 231
Bibliographie 233

Chapitre 9
Équations maîtresses 235
1 Processus de Markov. Équation de Chapman-Kolmogorov 236
2 Équation maîtresse pour un processus aléatoire markovien 239
3 Équation maîtresse de Pauli 242
4 Équation maîtresse généralisée 245
5 De l'équation maîtresse généralisée à l'équation maîtresse de Pauli 246
6 Discussion 248
Bibliographie 251
Références 251

Chapitre 10
Mouvement brownien. Modèle de Langevin 253
1 Modèle de Langevin 254
2 Réponse et relaxation 256
3 Fluctuations de vitesse à l'équilibre 262
4 Analyse harmonique du modèle de Langevin 265
5 Échelles de temps 268
Bibliographie 270
Références 270

Complément 10.A
Modèle de Langevin généralisé 272
1 Équation de Langevin généralisée 272
2 Admittance complexe 274
3 Analyse harmonique du modèle de Langevin généralisé 275
4 Un modèle analytique 276
Bibliographie 278
Références 278

Complément 10.B
Mouvement brownien dans un bain d'oscillateurs 279
1 Modèle de Caldeira et Leggett 279
2 Dynamique de la particule libre ohmique 285
3 Équation de Langevin quantique 286
Bibliographie 288
Références 288

Complément 10.C
Théorème de Nyquist 289
1 Bruit thermique dans un circuit électrique 289
2 Théorème de Nyquist 289
Bibliographie 294
Références 294

Chapitre 11
Mouvement brownien. Équation de Fokker-Planck 295
1 Évolution de la fonction de distribution de la vitesse 296
2 Développement de Kramers-Moyal 298
3 Équation de Fokker-Planck 301
4 Mouvement brownien et processus de Markov 304
Bibliographie 307
Références 307

Complément 11.A
Marche au hasard 309
1 Le marcheur ivre 309
2 Diffusion du marcheur ivre sur un réseau 310
3 Équation de diffusion 311
Bibliographie 313
Références 313

Complément 11.B
Mouvement brownien. Processus gaussiens 314
1 Analyse harmonique des processus gaussiens stationnaires 314
2 Processus stationnaires gaussiens et markoviens 315
3 Application au mouvement brownien 318
Bibliographie 320
Références 320

Chapitre 12
Réponses linéaires. Corrélations à l'équilibre 321
1 Fonctions de réponse linéaire 322
2 Susceptibilités généralisées 323
3 Relations de Kramers-Kronig 326

4 Dissipation 327
5 Phénomènes non uniformes 328
6 Fonctions de corrélation à l'équilibre 330
7 Propriétés des fonctions d'autocorrélation à l'équilibre 335
Appendice du chapitre 12
Autre démonstration des relations de Kramers-Kronig 340
Bibliographie 342
Références 342

Complément 12.A
Réponse linéaire d'un oscillateur amorti 343
1 Intérêt général de l'étude de l'oscillateur amorti 343
2 Oscillateur harmonique non amorti 343
3 Oscillateur amorti par frottement visqueux 344
4 Susceptibilité généralisée 346
5 Fonction de réponse du déplacement 348
Bibliographie 349

Complément 12.B
Polarisation électronique 350
1 Modèle semi-classique 350
2 Fonction de réponse de la polarisation 351
3 Susceptibilité généralisée 352
4 Comparaison avec le modèle de Lorentz 353
Bibliographie 355

Complément 12.C
Exemples de facteurs de structure dynamiques 356
1 Les exemples 356
2 Atome libre 356
3 Atome dans un potentiel harmonique 358
Bibliographie 361

Chapitre 13
Théorie générale de la réponse linéaire 363
1 Objet de la théorie de la réponse linéaire 364
2 Évolution au premier ordre de l'opérateur densité 364
3 Fonction de réponse linéaire 367
4 Relation avec la fonction de corrélation canonique 370
5 Susceptibilité généralisée 371
6 Fonction spectrale 373
7 Relaxation 375
8 Symétries des fonctions de réponse et de corrélation 380
9 Phénomènes non uniformes 383

Appendices du chapitre 13
A1 Réponse linéaire classique 384
A2 Susceptibilité statique d'un système isolé et susceptibilité isotherme 386
Bibliographie 390
Références 390

Complément 13.A
Relaxation diélectrique 391
1 Constante diélectrique et polarisabilité 391
2 Mécanismes microscopiques de polarisation 394
3 Théorie de Debye de la relaxation diélectrique 395
4 Modèle microscopique de la polarisation orientationnelle 397
Bibliographie 402
Références 402

Complément 13.B
Résonance magnétique 403
1 Formulation du problème 403
2 Théorie phénoménologique 404
3 Modèle microscopique 408
Bibliographie 413

Chapitre 14
Théorème de fluctuation-dissipation 415
1 Dissipation 416
2 Fluctuations à l'équilibre 419
3 Théorème de fluctuation-dissipation 421
4 Positivité de $\omega\chi''_{AA}(\omega)$. Susceptibilité statique 425
5 Règles de somme 427
Bibliographie 431
Références 431

Complément 14.A
Dynamique dissipative d'un oscillateur harmonique 433
1 Oscillateur couplé à un bain thermique 433
2 Dynamique de l'oscillateur non couplé 433
3 Fonctions de réponse et susceptibilités d'un oscillateur couplé à un bain 436
4 Analyse de $\chi_{xx}(\omega)$ 439
5 Dynamique de l'oscillateur faiblement couplé 445
Bibliographie 447
Références 447

Chapitre 15
Théorie quantique du transport électronique 449
1 Formule de Kubo-Nakano 450
2 Formule de Kubo-Greenwood 453
3 Conductivité d'un gaz d'électrons en présence d'impuretés 457
Bibliographie 461
Références 461

Complément 15.A
Conductivité d'un métal faiblement désordonné 463
1 Introduction 463
2 Formule de Kubo-Greenwood 463
3 Conductivité d'un système macroscopique 466
4 Conductance d'un système mésoscopique : approche de Landauer . 468
5 Addition en série de résistances quantiques. Localisation 470
Bibliographie 475
Références 475

Chapitre 16
Coefficients de transport thermiques 477
1 La méthode de Kubo indirecte 478
2 Source d'entropie et « hamiltonien » équivalent 482
Bibliographie 487
Références 487

Complément 16.A
Ondes lumineuses diffusives 488
1 Le transport diffusif de la lumière 488
2 Coefficient de diffusion de l'intensité lumineuse 490
3 Spectroscopie par ondes diffusives 493
Bibliographie 497
Références 497

Complément 16.B
Diffusion de la lumière par un fluide 498
1 Introduction 498
2 Équations hydrodynamiques linéarisées 499
3 Fluctuations transverses 500
4 Fluctuations longitudinales 503
5 Facteur de structure dynamique 509
Bibliographie 511
Références 511

Index 513