



# PHYSIQUE DES SOLIDES

**Neil W. Ashcroft et N. David Mermin**

TRADUCTION PAR FRANCK BIET ET HAMID KACHKACHI

  
**EDP**  
SCIENCES

# Table des matières

|                                                                                        |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Préface                                                                                | xv        |
| Tables importantes                                                                     | xxi       |
| <b>1 Théorie de Drude des métaux</b>                                                   | <b>1</b>  |
| 1.1 Hypothèses fondamentales du modèle de Drude . . . . .                              | 2         |
| 1.2 Conductivité électrique d'un métal en courant continu . . . . .                    | 7         |
| 1.3 Effet Hall et magnétorésistance . . . . .                                          | 13        |
| 1.4 Conductivité électrique en courant alternatif . . . . .                            | 18        |
| 1.5 Conductivité thermique d'un métal . . . . .                                        | 23        |
| 1.6 Problèmes . . . . .                                                                | 30        |
| <b>2 Théorie de Sommerfeld des métaux</b>                                              | <b>33</b> |
| 2.1 Propriétés de l'état fondamental d'un gaz d'électrons . . . . .                    | 35        |
| 2.2 Démonstration de la distribution de Fermi-Dirac . . . . .                          | 45        |
| 2.3 Propriétés thermiques du gaz d'électrons libres . . . . .                          | 48        |
| 2.4 Théorie de Sommerfeld de la conduction dans les métaux . . . . .                   | 56        |
| 2.5 Problèmes . . . . .                                                                | 62        |
| <b>3 Défauts du modèle des électrons libres</b>                                        | <b>65</b> |
| 3.1 Difficultés du modèle des électrons libres . . . . .                               | 65        |
| 3.2 Récapitulation des hypothèses de base . . . . .                                    | 68        |
| <b>4 Réseaux cristallins</b>                                                           | <b>73</b> |
| 4.1 Réseaux de Bravais . . . . .                                                       | 74        |
| 4.2 Réseaux infinis et cristaux finis . . . . .                                        | 76        |
| 4.3 Illustrations supplémentaires et exemples importants . . . . .                     | 77        |
| 4.4 Note sur l'usage . . . . .                                                         | 80        |
| 4.5 Nombre de coordination . . . . .                                                   | 82        |
| 4.6 Maille primitive . . . . .                                                         | 82        |
| 4.7 Maille primitive ; maille conventionnelle . . . . .                                | 85        |
| 4.8 Maille primitive de Wigner-Seitz . . . . .                                         | 85        |
| 4.9 Structure cristalline ; réseau à motif . . . . .                                   | 87        |
| 4.10 Exemples importants de structures cristallines et de réseaux<br>à motif . . . . . | 89        |
| 4.11 Autres aspects des réseaux cristallins . . . . .                                  | 97        |
| 4.12 Problèmes . . . . .                                                               | 97        |

|          |                                                                                      |            |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>5</b> | <b>Le réseau réciproque</b>                                                          | <b>99</b>  |
| 5.1      | Définition du réseau réciproque                                                      | 99         |
| 5.2      | Le réseau réciproque est un réseau de Bravais                                        | 100        |
| 5.3      | Réseau réciproque du réseau réciproque                                               | 101        |
| 5.4      | Exemples importants                                                                  | 102        |
| 5.5      | Volume de la maille primitive du réseau réciproque                                   | 103        |
| 5.6      | Première zone de Brillouin                                                           | 103        |
| 5.7      | Plans réticulaires                                                                   | 104        |
| 5.8      | Indices de Miller des plans réticulaires                                             | 106        |
| 5.9      | Quelques conventions pour spécifier les direction                                    | 107        |
| 5.10     | Problèmes                                                                            | 109        |
| <b>6</b> | <b>Détermination des structures cristallines...</b>                                  | <b>111</b> |
| 6.1      | Formulation de Bragg de la diffraction des rayons X<br>par un cristal                | 112        |
| 6.2      | Formulation de von Laue de la diffraction des rayons X<br>par un cristal             | 113        |
| 6.3      | Équivalence des formulations de Bragg et de von Laue                                 | 116        |
| 6.4      | Géométries expérimentales suggérées par la condition<br>de Laue                      | 118        |
| 6.4.1    | Construction d'Ewald                                                                 | 118        |
| 6.5      | Diffraction par un réseau monoatomique à motif ; facteur<br>de structure géométrique | 123        |
| 6.6      | Diffraction par un cristal polyatomique ; facteur de forme<br>atomique               | 127        |
| 6.7      | Problèmes                                                                            | 128        |
| <b>7</b> | <b>Classification des réseaux de Bravais...</b>                                      | <b>131</b> |
| 7.1      | Classification des réseaux de Bravais                                                | 132        |
| 7.2      | Groupes d'espace et groupes ponctuels cristallographiques                            | 140        |
| 7.3      | Exemples pris parmi les éléments                                                     | 149        |
| 7.4      | Problèmes                                                                            | 151        |
| <b>8</b> | <b>Niveaux électroniques dans un potentiel périodique</b>                            | <b>155</b> |
| 8.1      | Potentiel périodique                                                                 | 156        |
| 8.2      | Théorème de Bloch                                                                    | 158        |
| 8.3      | Première démonstration du théorème de Bloch                                          | 158        |
| 8.4      | Conditions aux limites de Born-von Karman                                            | 160        |
| 8.5      | Deuxième démonstration du théorème de Bloch                                          | 162        |
| 8.6      | Remarques générales sur le théorème de Bloch                                         | 164        |
| 8.7      | Surface de Fermi                                                                     | 167        |
| 8.8      | Densité de niveaux                                                                   | 169        |
| 8.9      | Problèmes                                                                            | 173        |

|                                                                                             |            |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>9 Électrons dans un potentiel périodique faible</b>                                      | <b>179</b> |
| 9.1 Équation de Schrödinger pour un potentiel faible                                        | 180        |
| 9.2 Niveaux d'énergie près d'un seul plan de Bragg                                          | 185        |
| 9.3 Bandes d'énergie à une dimension                                                        | 189        |
| 9.4 Courbes énergie-vecteur d'onde à trois dimensions                                       | 190        |
| 9.5 Bande interdite                                                                         | 191        |
| 9.6 Zones de Brillouin                                                                      | 192        |
| 9.7 Facteur de structure géométrique                                                        | 196        |
| 9.8 Couplage spin-orbite                                                                    | 199        |
| 9.9 Problèmes                                                                               | 201        |
| <b>10 Méthode des liaisons fortes</b>                                                       | <b>207</b> |
| 10.1 Formulation générale                                                                   | 208        |
| 10.2 Bandes $s$ de liaisons fortes                                                          | 214        |
| 10.3 Remarques générales sur la méthode des liaisons fortes                                 | 217        |
| 10.4 Fonctions de Wannier                                                                   | 221        |
| 10.5 Problèmes                                                                              | 223        |
| <b>11 Autres méthodes pour calculer la structure de bandes</b>                              | <b>227</b> |
| 11.1 Caractéristiques générales des fonctions d'onde de la bande de valence                 | 230        |
| 11.2 Méthode cellulaire                                                                     | 232        |
| 11.3 Méthode des ondes planes augmentées (OPA)                                              | 238        |
| 11.4 Méthode des fonctions de Green de Korringa, Kohn et Rostoker (KKR)                     | 241        |
| 11.5 Méthode des ondes planes orthogonalisées (OPO)                                         | 245        |
| 11.6 Pseudopotentiel                                                                        | 248        |
| 11.7 Méthodes combinées                                                                     | 250        |
| 11.8 Problèmes                                                                              | 250        |
| <b>12 Modèle semi-classique de la dynamique des électrons</b>                               | <b>253</b> |
| 12.1 Description du modèle semi-classique                                                   | 258        |
| 12.2 Commentaires et restrictions                                                           | 259        |
| 12.3 Conséquences des équations du mouvement semi-classiques                                | 263        |
| 12.4 Problèmes                                                                              | 285        |
| <b>13 Théorie semi-classique de la conduction dans les métaux</b>                           | <b>289</b> |
| 13.1 Approximation du temps de relaxation                                                   | 290        |
| 13.2 Calcul de la fonction de distribution hors équilibre                                   | 291        |
| 13.3 Simplification de la fonction de distribution hors équilibre dans des cas particuliers | 295        |
| 13.4 Conductivité électrique en courant continu                                             | 296        |
| 13.5 Conductivité électrique en courant alternatif                                          | 299        |
| 13.6 Conductivité thermique                                                                 | 300        |
| 13.7 Pouvoir thermoélectrique                                                               | 304        |

|           |                                                                                   |            |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 13.8      | Autres effets thermoélectriques . . . . .                                         | 307        |
| 13.9      | Conductivité semi-classique dans un champ magnétique uni-<br>forme . . . . .      | 308        |
| 13.10     | Problèmes . . . . .                                                               | 308        |
| <b>14</b> | <b>Mesure de la surface de Fermi . . . . .</b>                                    | <b>313</b> |
| 14.1      | Effet de Haas-van Alphen . . . . .                                                | 314        |
| 14.2      | Électrons libres dans un champ magnétique uniforme . . . . .                      | 319        |
| 14.3      | Niveaux des électrons de Bloch dans un champ magnétique<br>uniforme . . . . .     | 321        |
| 14.4      | Origine du phénomène oscillatoire . . . . .                                       | 322        |
| 14.5      | Effet du spin des électrons sur le phénomène oscillatoire . . . . .               | 324        |
| 14.6      | Autres méthodes d'exploration de la surface de Fermi . . . . .                    | 325        |
| 14.7      | Problèmes . . . . .                                                               | 333        |
| <b>15</b> | <b>Structure de bandes de quelques métaux . . . . .</b>                           | <b>335</b> |
| 15.1      | Métaux monovalents . . . . .                                                      | 336        |
| 15.2      | Métaux divalents . . . . .                                                        | 353        |
| 15.3      | Métaux trivalents . . . . .                                                       | 355        |
| 15.4      | Métaux tétravalents . . . . .                                                     | 359        |
| 15.5      | Semi-métaux . . . . .                                                             | 360        |
| 15.6      | Métaux de transition . . . . .                                                    | 362        |
| 15.7      | Métaux de terres rares . . . . .                                                  | 365        |
| 15.8      | Alliages . . . . .                                                                | 366        |
| 15.9      | Problèmes . . . . .                                                               | 369        |
| <b>16</b> | <b>Au-delà de l'approximation du temps de relaxation . . . . .</b>                | <b>371</b> |
| 16.1      | Sources de la diffusion des électrons . . . . .                                   | 373        |
| 16.2      | Probabilité de diffusion et temps de relaxation . . . . .                         | 374        |
| 16.3      | Taux de variation de la fonction de distribution due<br>aux collisions . . . . .  | 375        |
| 16.4      | Détermination de la fonction de distribution :<br>équation de Boltzmann . . . . . | 377        |
| 16.5      | Diffusion par des impuretés . . . . .                                             | 380        |
| 16.6      | Loi de Wiedemann-Franz . . . . .                                                  | 382        |
| 16.7      | Règle de Matthiessen . . . . .                                                    | 384        |
| 16.8      | Diffusion dans des matériaux isotropes . . . . .                                  | 385        |
| 16.9      | Problèmes . . . . .                                                               | 388        |
| <b>17</b> | <b>Au-delà de l'approximation des électrons indépendants . . . . .</b>            | <b>391</b> |
| 17.1      | Échange : approximation de Hartree-Fock . . . . .                                 | 394        |
| 17.2      | Équations de Hartree-Fock pour des électrons libres . . . . .                     | 397        |
| 17.3      | Effet d'écran (général) . . . . .                                                 | 401        |
| 17.4      | Théorie de l'effet d'écran de Thomas-Fermi . . . . .                              | 404        |
| 17.5      | Théorie de l'effet d'écran de Lindhard . . . . .                                  | 407        |

|                                                                                                            |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>22 Théorie classique du cristal harmonique</b>                                                          | <b>501</b> |
| 22.1 L'approximation harmonique . . . . .                                                                  | 504        |
| 22.2 Approximation adiabatique . . . . .                                                                   | 505        |
| 22.3 Chaleur spécifique d'un cristal classique . . . . .                                                   | 506        |
| 22.4 Modes normaux d'un réseau de Bravais monoatomique<br>unidimensionnel . . . . .                        | 511        |
| 22.5 Modes normaux d'un réseau unidimensionnel à motif . . . . .                                           | 515        |
| 22.6 Modes normaux d'un réseau de Bravais monoatomique<br>tridimensionnel . . . . .                        | 520        |
| 22.7 Modes normaux d'un réseau tridimensionnel à motif . . . . .                                           | 526        |
| 22.8 Relation avec la théorie de l'élasticité . . . . .                                                    | 527        |
| 22.9 Problèmes . . . . .                                                                                   | 532        |
| <b>23 Théorie quantique du cristal harmonique</b>                                                          | <b>537</b> |
| 23.1 Modes normaux et phonons . . . . .                                                                    | 538        |
| 23.2 Forme générale de la chaleur spécifique du réseau . . . . .                                           | 539        |
| 23.3 Chaleur spécifique à haute température . . . . .                                                      | 541        |
| 23.4 Chaleur spécifique à basse température . . . . .                                                      | 542        |
| 23.5 Chaleur spécifique aux températures intermédiaires : modèles<br>de Debye et d'Einstein . . . . .      | 544        |
| 23.6 Comparaison de la chaleur spécifique du réseau et de la chaleur<br>spécifique électronique . . . . .  | 551        |
| 23.7 Densité de modes normaux (densité de niveaux de phonons) . . . . .                                    | 552        |
| 23.8 Analogie avec la théorie du rayonnement du corps noir . . . . .                                       | 554        |
| 23.9 Problèmes . . . . .                                                                                   | 556        |
| <b>24 Mesure des lois de dispersion des phonons</b>                                                        | <b>559</b> |
| 24.1 Diffusion des neutrons par un cristal . . . . .                                                       | 560        |
| 24.2 Diffusion d'un rayonnement électromagnétique par un cristal . . . . .                                 | 572        |
| 24.3 Représentation ondulatoire de l'interaction du rayonnement<br>avec les vibrations du réseau . . . . . | 575        |
| 24.4 Problèmes . . . . .                                                                                   | 579        |
| <b>25 Effets anharmoniques dans les cristaux</b>                                                           | <b>581</b> |
| 25.1 Aspects généraux des théories anharmoniques . . . . .                                                 | 583        |
| 25.2 Équation d'état et dilatation thermique d'un cristal . . . . .                                        | 584        |
| 25.3 Dilatation thermique ; paramètre de Grüneisen . . . . .                                               | 587        |
| 25.4 Dilatation thermique des métaux . . . . .                                                             | 589        |
| 25.5 Conductivité thermique du réseau : approche générale . . . . .                                        | 591        |
| 25.6 Conductivité thermique du réseau : théorie cinétique<br>élémentaire . . . . .                         | 595        |
| 25.7 Second son . . . . .                                                                                  | 604        |
| 25.8 Problèmes . . . . .                                                                                   | 607        |

|                                                                                                      |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>26 Phonons dans les métaux</b>                                                                    | <b>611</b> |
| 26.1 Théorie élémentaire de la loi de dispersion des phonons . . . .                                 | 612        |
| 26.2 Anomalies de Kohn . . . . .                                                                     | 615        |
| 26.3 Constante diélectrique d'un métal . . . . .                                                     | 615        |
| 26.4 Interaction électron-électron effective . . . . .                                               | 618        |
| 26.5 Contribution des phonons à la relation énergie-vecteur d'onde<br>électronique . . . . .         | 620        |
| 26.6 Interaction électron-phonon . . . . .                                                           | 622        |
| 26.7 Résistivité électrique dépendante de la température<br>des métaux . . . . .                     | 624        |
| 26.8 Modification de la loi en $T^5$ par les processus umklapp . . . .                               | 628        |
| 26.9 Trainage de phonons . . . . .                                                                   | 630        |
| 26.10 Problèmes . . . . .                                                                            | 631        |
| <b>27 Propriétés diélectriques des isolants</b>                                                      | <b>635</b> |
| 27.1 Équations de Maxwell macroscopiques de l'électrostatique . . .                                  | 636        |
| 27.2 Théorie du champ local . . . . .                                                                | 642        |
| 27.3 Théorie de la polarisabilité . . . . .                                                          | 646        |
| 27.4 Isolants covalents . . . . .                                                                    | 657        |
| 27.5 Pyroélectricité . . . . .                                                                       | 659        |
| 27.6 Ferroélectricité . . . . .                                                                      | 662        |
| 27.7 Problèmes . . . . .                                                                             | 665        |
| <b>28 Semi-conducteurs homogènes</b>                                                                 | <b>669</b> |
| 28.1 Exemples de semi-conducteurs . . . . .                                                          | 673        |
| 28.2 Structures de bandes typiques des semi-conducteurs . . . . .                                    | 677        |
| 28.3 Résonance cyclotron . . . . .                                                                   | 679        |
| 28.4 Nombre de porteurs de charge à l'équilibre thermique . . . . .                                  | 682        |
| 28.5 Niveaux d'impuretés . . . . .                                                                   | 688        |
| 28.6 Population des niveaux d'impuretés à l'équilibre thermique . .                                  | 692        |
| 28.7 Densités de porteurs de charge à l'équilibre thermique<br>des semi-conducteurs impurs . . . . . | 695        |
| 28.8 Bande de conduction due aux impuretés . . . . .                                                 | 697        |
| 28.9 Théorie du transport dans les semi-conducteurs non dégénérés                                    | 698        |
| 28.10 Problèmes . . . . .                                                                            | 699        |
| <b>29 Semi-conducteurs hétérogènes</b>                                                               | <b>703</b> |
| 29.1 Modèle semi-classique . . . . .                                                                 | 705        |
| 29.2 Jonction $p$ - $n$ à l'équilibre . . . . .                                                      | 706        |
| 29.3 Schéma élémentaire de redressement par une jonction $p$ - $n$ . . .                             | 713        |
| 29.4 Aspects physiques généraux du cas hors équilibre . . . . .                                      | 716        |
| 29.5 Théorie plus détaillée de la jonction $p$ - $n$ hors équilibre . . . .                          | 723        |
| 29.6 Problèmes . . . . .                                                                             | 729        |

|                                                                                     |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>30 Défauts dans les cristaux</b>                                                 | <b>735</b> |
| 30.1 Défauts ponctuels : aspects thermodynamiques généraux . . .                    | 736        |
| 30.2 Défauts et équilibre thermodynamique . . . . .                                 | 740        |
| 30.3 Défauts ponctuels : conductivité électrique des cristaux<br>ioniques . . . . . | 742        |
| 30.4 Centres colorés . . . . .                                                      | 743        |
| 30.5 Polarons . . . . .                                                             | 748        |
| 30.6 Excitons . . . . .                                                             | 749        |
| 30.7 Défauts linéaires : dislocations . . . . .                                     | 752        |
| 30.8 Résistance mécanique des cristaux . . . . .                                    | 757        |
| 30.9 Durcissement . . . . .                                                         | 759        |
| 30.10 Dislocations et croissance des cristaux . . . . .                             | 759        |
| 30.11 Whiskers . . . . .                                                            | 760        |
| 30.12 Observations des dislocations et d'autres défauts . . . . .                   | 761        |
| 30.13 Imperfections de surface : défauts d'empilement . . . . .                     | 761        |
| 30.14 Joints de grains de faible désorientation . . . . .                           | 762        |
| 30.15 Problèmes . . . . .                                                           | 763        |
| <b>31 Diamagnétisme et paramagnétisme</b>                                           | <b>767</b> |
| 31.1 Aimantation et susceptibilité . . . . .                                        | 768        |
| 31.2 Calcul des susceptibilités atomiques . . . . .                                 | 769        |
| 31.3 Diamagnétisme de Larmor . . . . .                                              | 773        |
| 31.4 Règles de Hund . . . . .                                                       | 775        |
| 31.5 Ions ayant une couche partiellement remplie . . . . .                          | 777        |
| 31.6 Désaimantation adiabatique . . . . .                                           | 786        |
| 31.7 Paramagnétisme de Pauli . . . . .                                              | 787        |
| 31.8 Diamagnétisme des électrons de conduction . . . . .                            | 792        |
| 31.9 Mesure du paramagnétisme de Pauli... . . . .                                   | 793        |
| 31.10 Diamagnétisme électronique dans les semi-conducteurs dopés .                  | 794        |
| 31.11 Problèmes . . . . .                                                           | 795        |
| <b>32 Interactions des électrons et structure magnétique</b>                        | <b>801</b> |
| 32.1 Estimation des énergies d'interaction dipolaires magnétiques .                 | 803        |
| 32.2 Propriétés magnétiques d'un système à deux électrons . . . .                   | 804        |
| 32.3 Calcul de la différence d'énergie entre singulet et triplet . . .              | 806        |
| 32.4 Hamiltonien de spin et modèle de Heisenberg . . . . .                          | 810        |
| 32.5 Échange . . . . .                                                              | 813        |
| 32.6 Interactions magnétiques dans le gaz d'électrons libres . . . .                | 814        |
| 32.7 Le modèle de Hubbard . . . . .                                                 | 817        |
| 32.8 Moments localisés dans les alliages . . . . .                                  | 818        |
| 32.9 Théorie de Kondo du minimum de résistance . . . . .                            | 820        |
| 32.10 Problèmes . . . . .                                                           | 822        |

|           |                                                                                                |            |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>33</b> | <b>Ordre magnétique</b>                                                                        | <b>827</b> |
| 33.1      | Types de structures magnétiques                                                                | 828        |
| 33.2      | Observation des structures magnétiques                                                         | 832        |
| 33.3      | Propriétés thermodynamiques à l'établissement de l'ordre magnétique                            | 833        |
| 33.4      | Propriétés à température nulle : état fondamental d'un corps ferromagnétique de Heisenberg     | 837        |
| 33.5      | Propriétés à température nulle : état fondamental d'un corps antiferromagnétique de Heisenberg | 839        |
| 33.6      | Ondes de spin                                                                                  | 840        |
| 33.7      | Susceptibilité à haute température                                                             | 845        |
| 33.8      | Analyse du point critique                                                                      | 849        |
| 33.9      | Théorie de champ moyen                                                                         | 852        |
| 33.10     | Domaines                                                                                       | 857        |
| 33.11     | Facteurs de désaimantation                                                                     | 860        |
| 33.12     | Problèmes                                                                                      | 862        |
| <b>34</b> | <b>Supraconductivité</b>                                                                       | <b>865</b> |
| 34.1      | Température critique                                                                           | 868        |
| 34.2      | Courants persistants                                                                           | 870        |
| 34.3      | Propriétés thermoélectriques                                                                   | 871        |
| 34.4      | Propriétés magnétiques : diamagnétisme parfait                                                 | 871        |
| 34.5      | Propriétés magnétiques : champ critique                                                        | 873        |
| 34.6      | Chaleur spécifique                                                                             | 875        |
| 34.7      | Autres manifestations du gap d'énergie                                                         | 877        |
| 34.8      | Équation de London                                                                             | 879        |
| 34.9      | Théorie microscopique : aspects qualitatifs                                                    | 882        |
| 34.10     | Prédictions quantitatives de la théorie microscopique élémentaire                              | 886        |
| 34.11     | Théorie microscopique et effet Meissner                                                        | 891        |
| 34.12     | Théorie de Ginzburg-Landau                                                                     | 892        |
| 34.13     | Quantification du flux                                                                         | 893        |
| 34.14     | Théorie microscopique et courants persistants                                                  | 894        |
| 34.15     | Effet tunnel pour les supercourants ; effets Josephson                                         | 896        |
| 34.16     | Problèmes                                                                                      | 899        |
| <b>A</b>  | <b>Résumé des relations numériques...</b>                                                      | <b>903</b> |
| A.1       | Gaz de Fermi idéal                                                                             | 904        |
| A.2       | Temps de relaxation et libre parcours moyen                                                    | 904        |
| A.3       | Fréquence cyclotron                                                                            | 904        |
| A.4       | Fréquence de plasma                                                                            | 904        |
| <b>B</b>  | <b>Le potentiel chimique</b>                                                                   | <b>905</b> |
| <b>C</b>  | <b>Le développement de Sommerfeld</b>                                                          | <b>907</b> |

|                                                                                                          |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>D Développement en ondes planes des fonctions...</b>                                                  | <b>911</b> |
| <b>E Vitesse et masse effective des électrons de Bloch</b>                                               | <b>915</b> |
| <b>F Quelques identités liées à l'analyse de Fourier...</b>                                              | <b>917</b> |
| <b>G Principe variationnel pour l'équation de Schrödinger</b>                                            | <b>919</b> |
| <b>H Formulation hamiltonienne...</b>                                                                    | <b>921</b> |
| <b>I Théorème de Green pour les fonctions périodiques</b>                                                | <b>923</b> |
| <b>J Conditions d'absence de transitions interbandes...</b>                                              | <b>925</b> |
| <b>K Propriétés optiques des solides</b>                                                                 | <b>927</b> |
| K.1 Hypothèse de localité . . . . .                                                                      | 927        |
| K.2 Hypothèse d'isotropie . . . . .                                                                      | 927        |
| K.3 Nature conventionnelle de la distinction<br>entre $\epsilon^0(\omega)$ et $\sigma(\omega)$ . . . . . | 928        |
| K.4 Réflectivité . . . . .                                                                               | 929        |
| K.5 Détermination de $\epsilon(\omega)$ à partir<br>de la réflectivité mesurée . . . . .                 | 930        |
| K.6 Relation entre $\epsilon$ et l'absorption interbandes<br>dans un métal . . . . .                     | 930        |
| <b>L Théorie quantique du cristal harmonique</b>                                                         | <b>933</b> |
| <b>M Conservation du moment cristallin</b>                                                               | <b>939</b> |
| M.1 Démonstration de la loi de conservation . . . . .                                                    | 941        |
| M.2 Applications . . . . .                                                                               | 943        |
| <b>N Théorie de la diffusion des neutrons par un cristal</b>                                             | <b>947</b> |
| N.1 Application à la diffraction des rayons X . . . . .                                                  | 953        |
| <b>O Termes anharmoniques et processus à <math>n</math> phonons</b>                                      | <b>955</b> |
| <b>P Évaluation du facteur de Landé <math>g</math></b>                                                   | <b>957</b> |
| <b>Index</b>                                                                                             | <b>959</b> |