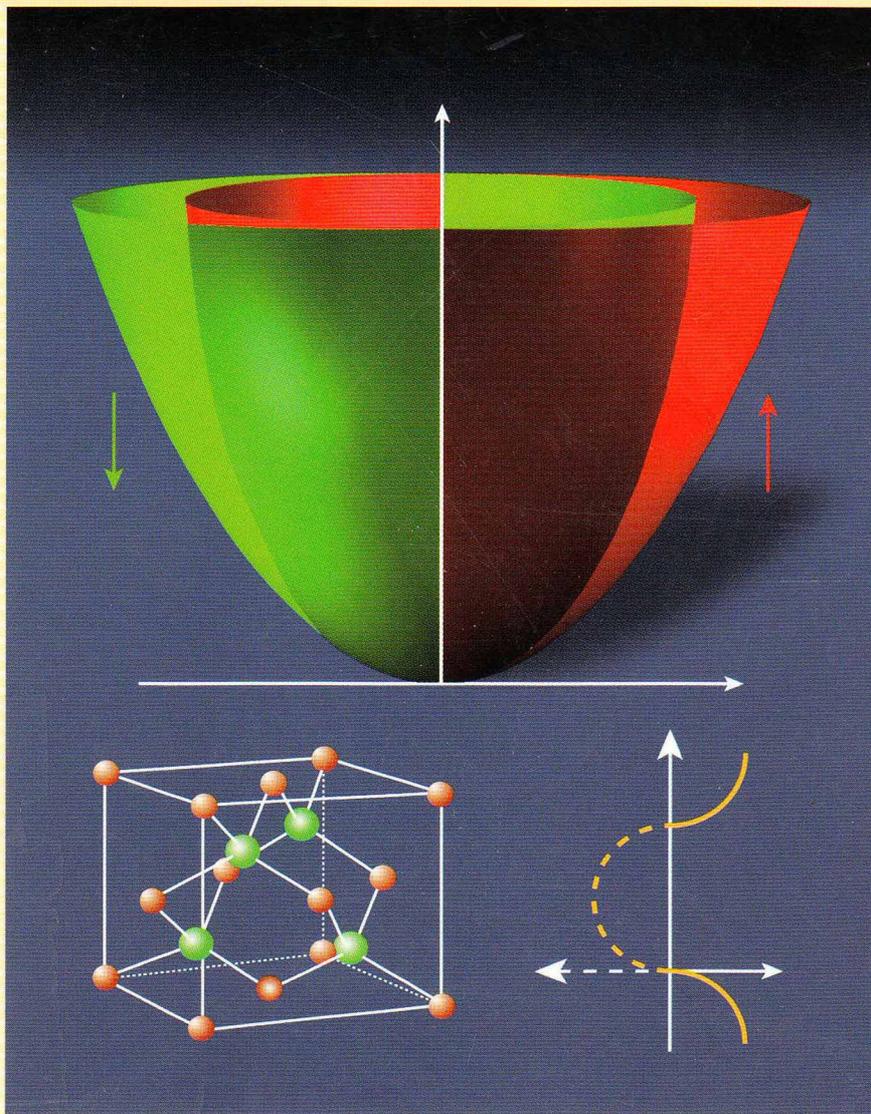


# Semi-conducteurs : les bases de la théorie k.p



# Table des matières

Avant-propos

Introduction 1

I Structure électronique 9

1	Symétrie et fonctions d'onde	11
1.1	Les atomes des semi-conducteurs . . . . .	12
1.2	Fonctions de cristal périodique . . . . .	13
1.2.1	Fonctions de Bloch . . . . .	13
1.2.2	Largeur de la zone de Brillouin . . . . .	14
1.2.3	Normalisation des fonctions de Bloch . . . . .	14
1.2.4	Développement de $U_{n\mathbf{k}}(\mathbf{r})$ en fonction des $U_{n\mathbf{0}}(\mathbf{r})$ . . .	16
1.2.5	Fonctions de Luttinger-Kohn . . . . .	17
1.3	Bande interdite et masse effective . . . . .	18
1.4	Une description simpliste ou pourquoi le silicium est un semi-conducteur . . . . .	22
1.5	Structure cristalline et zone de Brillouin . . . . .	26
1.6	Combinaison linéaire d'orbitales atomiques . . . . .	31
1.6.1	Idée directrice . . . . .	31
1.6.2	Les liaisons fortes . . . . .	31
1.6.3	Équation séculaire . . . . .	33
1.6.4	Structure de bande . . . . .	37
1.6.5	Caractère $s$ et $p$ des fonctions d'onde . . . . .	38
1.7	Symétrie des fonctions d'onde et éléments de matrice . . . . .	43
1.7.1	Fonctions d'onde orbitales . . . . .	43
1.7.2	Fonctions d'onde mélangées de spin . . . . .	51
1.8	Fonctions d'onde du centre de zone . . . . .	52
1.8.1	Les fonctions "sphériques" . . . . .	52
1.8.2	Les fonctions "cubiques" . . . . .	53
1.8.3	Utilité des notations de Luttinger-Kohn et Kane . . . . .	55

1.8.4	Fonction d'onde de trou . . . . .	56
1.9	Lexique de théorie des groupes . . . . .	57
1.9.1	Groupe simple (sans spin) . . . . .	57
1.9.2	Groupe double (avec spin) . . . . .	58
1.10	Semi-conducteur . . . . .	60
1.10.1	Définition . . . . .	60
1.10.2	Semi-conducteur à bande interdite "directe" . . . . .	61
1.10.3	Semi-conducteur à bande interdite "indirecte" . . . . .	61
1.10.4	Semi-conducteur à bande interdite nulle . . . . .	62
1.10.5	Présentation générale des semi-conducteurs . . . . .	64
1.11	Semi-métal . . . . .	71
1.11.1	Semi-métal strictement compensé . . . . .	71
1.11.2	Semi-métal usuel . . . . .	72
1.A	Appendice : Fonctions et théorème de Bloch . . . . .	73
1.A.1	Propriétés . . . . .	73
1.A.2	Zone de Brillouin . . . . .	75
1.A.3	Doublement de maille . . . . .	76
1.B	Appendice : Renversement du temps et "Parité" de $E_n(\mathbf{k})$ . . . . .	78
1.B.1	Conjugaison de Kramers . . . . .	78
1.B.2	Dégénérescence de spin et dégénérescence de Kramers . . . . .	79
1.B.3	Pente de $E_n(\mathbf{k})$ . . . . .	81
1.C	Appendice : Couplage spin-orbite dans les solides . . . . .	81
1.C.1	Idée générale . . . . .	81
1.C.2	Description précise . . . . .	82
<b>2</b>	<b>Principe de la théorie <math>\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}</math></b> . . . . .	<b>85</b>
2.1	Théorie des perturbations . . . . .	86
2.1.1	Hamiltonien de départ . . . . .	87
2.1.2	Cas d'un niveau non dégénéré . . . . .	87
2.1.3	Cas d'un niveau dégénéré : renormalisation de Löwdin . . . . .	88
2.1.4	Cas de niveaux quasi-dégénérés : renormalisation de Luttinger-Kohn . . . . .	89
2.2	L'hamiltonien $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ . . . . .	92
2.2.1	Point de départ . . . . .	92
2.2.2	Principe . . . . .	92
2.2.3	Premier cas : un seul état est important . . . . .	94
2.2.4	Deuxième cas : deux états sont importants . . . . .	95
2.A	Appendice : Théorie des perturbations de Luttinger-Kohn . . . . .	106
2.A.1	Rappel de la théorie usuelle des perturbations . . . . .	106
2.A.2	Objet de l'étude . . . . .	107
2.A.3	Démonstration . . . . .	107

<b>3</b>	<b>Structure de bande : I</b>	<b>125</b>
3.1	Schémas de principe . . . . .	127
3.2	Hamiltonien sans couplage spin-orbite . . . . .	128
3.2.1	Ce qui est supposé connu . . . . .	128
3.2.2	Hamiltonien à l'intérieur de $\{\Gamma_1 ; \Gamma_5\}$ . . . . .	132
3.2.3	Hamiltonien à l'intérieur de $\{\Gamma_{5C} ; \Gamma_5\}$ . . . . .	136
3.2.4	Hamiltonien à l'intérieur de $\{\Gamma_{5C} ; \Gamma_1 ; \Gamma_5\}$ . . . . .	137
3.2.5	Hamiltonien projeté sur $\Gamma_5$ : l'hamiltonien de Dresselhaus-Kip-Kittel . . . . .	143
3.3	Hamiltonien avec couplage spin-orbite . . . . .	148
3.3.1	Ce qui est supposé connu . . . . .	148
3.3.2	L'hamiltonien à l'intérieur de $\{\Gamma_6 ; \Gamma_8 ; \Gamma_7\}$ ou hamiltonien de Kane . . . . .	151
3.3.3	Hamiltonien à l'intérieur de $\{\Gamma_{8C} ; \Gamma_{7C} ; \Gamma_6 ; \Gamma_8 ; \Gamma_7\}$ . . . . .	154
3.3.4	L'hamiltonien projeté sur $\{\Gamma_6 ; \Gamma_8 ; \Gamma_7\}$ : l'hamiltonien $H_8$ de Pidgeon-Brown . . . . .	162
3.3.5	L'hamiltonien projeté sur $\Gamma_8$ : l'hamiltonien $H_4$ de Luttinger-Kohn . . . . .	174
3.3.6	L'hamiltonien projeté sur $\{\Gamma_8 ; \Gamma_7\}$ : l'hamiltonien $6 \times 6$ de Luttinger-Kohn ou hamiltonien $H_6$ . . . . .	178
3.A	Appendice : Les coefficients $F, G, H_1, H_2$ de Dresselhaus-Kip-Kittel . . . . .	183
3.B	Appendice : Relations entre les paramètres de Luttinger et de Dresselhaus-Kip-Kittel . . . . .	188
3.C	Appendice : Relations entre les paramètres de Luttinger et les paramètres de Pidgeon-Brown . . . . .	190
3.D	Appendice : Couplage spin-orbite dans les semi-conducteurs . . . . .	190
3.D.1	En théorie des groupes . . . . .	190
3.D.2	Calcul des éléments de matrice . . . . .	191
3.E	Appendice : L'hamiltonien de Kane à grand $  \mathbf{k}  $ . . . . .	193
3.F	Appendice : Passage d'une matrice sans spin à une matrice avec spin . . . . .	193
<b>4</b>	<b>Structure de bande : II</b>	<b>197</b>
4.1	Bande de valence et effet Zeeman (l'article de Luttinger) . . . . .	198
4.1.1	Hamiltonien relatif au niveau $\Gamma_5$ dit " $L$ " = 1 . . . . .	198
4.1.2	Hamiltonien relatif au niveau $\Gamma_8$ dit " $J$ " = 3/2 . . . . .	199
4.2	Décomposition de l'hamiltonien de Luttinger . . . . .	203
4.2.1	Idée générale . . . . .	203
4.2.2	Matrices utiles . . . . .	206
4.2.3	Liens entre les paramètres de Luttinger et les paramètres de Dresselhaus-Kip-Kittel : l'approximation sphérique . . . . .	207
4.3	Fonctions d'onde de l'hamiltonien de Luttinger-Kohn . . . . .	207
4.4	Influence de l'absence de centre d'inversion . . . . .	211

4.4.1	L'hamiltonien de Kane . . . . .	211
4.4.2	Perturbations venant des autres bandes . . . . .	214
4.5	Les semi-conducteurs à bande interdite nulle . . . . .	220
4.6	Hamiltonien de contrainte . . . . .	222
4.6.1	Nomenclature . . . . .	222
4.6.2	Généralités . . . . .	222
4.6.3	Notations . . . . .	224
4.6.4	L'hamiltonien de Bir-Pikus . . . . .	227
4.6.5	L'hamiltonien de Bir-Pikus-Pidgeon-Brown . . . . .	229
4.6.6	Cas des ellipsoïdes . . . . .	232
4.6.7	Influence d'une contrainte uniaxiale sur les dispersions en énergie en $\Gamma_8$ . . . . .	232
4.6.8	Cas où $\mathbf{k} = (0, 0, k_z)$ . . . . .	234
4.6.9	Influence d'une contrainte biaxiale sur les dispersions en énergie en $\Gamma_8$ . . . . .	235
4.7	Description en masse effective d'un donneur . . . . .	237
4.7.1	Bande interdite directe . . . . .	237
4.7.2	Bande interdite indirecte . . . . .	243
4.8	Description en masse effective d'un accepteur . . . . .	244
4.9	Hamiltonien effectif . . . . .	245
4.10	La wurtzite (GaN, CdS, CdSe) . . . . .	251
4.10.1	Description quasi-cubique . . . . .	251
4.10.2	La wurtzite (Groupe $C_{6v}$ ) . . . . .	254
4.11	Onde évanescente . . . . .	259
4.11.1	"Hamiltonien" $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ non hermitique . . . . .	259
4.11.2	Une description simple . . . . .	260
4.11.3	Utilisation de la matrice Pidgeon-Brown . . . . .	261
4.A	Appendice : Termes impairs en $k$ . . . . .	263
4.A.1	Notations liées au couplage spin-orbite . . . . .	263
4.A.2	Termes linéaires en $k$ dans la bande de valence $\Gamma_8$ . . . . .	264
4.A.3	Absence de termes linéaires en $k$ dans la bande de conduction $\Gamma_6$ de la blende de zinc . . . . .	265
4.A.4	Termes en $k^3$ . . . . .	266
4.B	Appendice : La matrice $14 \times 14$ ou hamiltonien $H_{14}$ . . . . .	269
4.C	Appendice : Remarque sur la fonction enveloppe . . . . .	276
4.D	Appendice : Théorie $\mathbf{k} \cdot \mathbf{p}$ au point $L$ du germanium . . . . .	276
4.E	Appendice : Transformation de Broido-Sham . . . . .	279
<b>5</b>	<b>Landé et Landau</b> . . . . .	<b>283</b>
5.1	Effet Zeeman et facteur de Landé . . . . .	284
5.1.1	Hamiltonien de conduction en présence d'un champ magnétique . . . . .	284
5.1.2	Facteur de Landé des électrons de conduction . . . . .	286
5.1.3	Effet Zeeman de la bande de valence : un aperçu . . . . .	287

5.2	Niveaux de Landau . . . . .	288
5.2.1	Niveaux de Landau d'une particule de charge $\pm e$ et de masse $m$ . . . . .	289
5.2.2	Bande de conduction . . . . .	290
5.2.3	Bande de valence . . . . .	291
<b>6</b>	<b>Hétérostructures</b>	<b>299</b>
6.1	La problématique Harrison-BenDaniel-Duke . . . . .	301
6.1.1	L'article de Harrison . . . . .	301
6.1.2	L'article BenDaniel-Duke . . . . .	302
6.2	Puits carré . . . . .	303
6.2.1	Définition . . . . .	303
6.2.2	Puits fini à masse constante . . . . .	303
6.3	L'approximation clef . . . . .	305
6.4	Bande de conduction . . . . .	305
6.4.1	Cas du puits infini . . . . .	305
6.4.2	Cas du puits fini . . . . .	307
6.4.3	Cas où la masse est anisotrope . . . . .	309
6.5	Bande de valence . . . . .	310
6.5.1	Cas du puits infini . . . . .	310
6.5.2	Cas du puits fini . . . . .	316
6.6	Densité d'états . . . . .	318
6.A	Appendice : L'hamiltonien de Burt-Foreman . . . . .	320
6.A.1	Rappel . . . . .	320
6.A.2	Point de départ . . . . .	321
6.A.3	Hamiltonien sans couplage spin-orbite . . . . .	323
6.A.4	Hamiltonien tenant compte du couplage spin-orbite . . . . .	327
6.B	Appendice : Bande de valence dans un puits infini . . . . .	332
6.B.1	Calculs préliminaires . . . . .	332
6.B.2	Calcul des masses planaires . . . . .	334
6.C	Appendice : Au delà de la masse effective et du puits infini . . . . .	335
6.C.1	Un puits fini peut-il être considéré comme infini ? . . . . .	335
6.C.2	Variation de l'énergie en fonction de la largeur du puits . . . . .	336
6.C.3	Remarque sur la fonction d'onde dans un puits infini . . . . .	336
<b>II</b>	<b>Optique et excitons</b>	<b>337</b>
<b>7</b>	<b>Quelques propriétés optiques des solides</b>	<b>339</b>
7.1	Système d'unités . . . . .	340
7.2	Origine de l'indice optique . . . . .	340
7.2.1	Cas d'une fréquence de couplage . . . . .	342
7.2.2	Cas de plusieurs fréquences de couplage . . . . .	349
7.2.3	Influence du champ local . . . . .	353

7.2.4	Courbe de dispersion des phonons . . . . .	356
7.2.5	Loi de Snell-Descartes . . . . .	359
7.3	Constante diélectrique et indice complexes . . . . .	359
7.4	Absorption, dispersion et réflectivité . . . . .	363
7.A	Appendice : Relations de Kramers-Kronig . . . . .	370
<b>8</b>	<b>Molécule d'hydrogène &amp; énergie d'échange électron-électron</b>	<b>373</b>
8.1	L'atome d'hydrogène . . . . .	374
8.2	Autres atomes . . . . .	378
8.2.1	Les fonctions d'onde . . . . .	378
8.2.2	Transitions optiques . . . . .	381
8.3	La molécule d'hydrogène ionisée $H_2^+$ . . . . .	387
8.3.1	Hamiltonien . . . . .	387
8.3.2	Approximation des combinaisons linéaires d'orbitales atomiques ou approximation CLOA . . . . .	388
8.3.3	Approximation des liaisons fortes . . . . .	389
8.3.4	L'énergie . . . . .	389
8.3.5	Fonction d'onde et probabilité de présence . . . . .	392
8.4	La molécule d'hydrogène $H_2$ . . . . .	394
8.4.1	L'approximation des combinaisons linéaires d'orbitales atomiques . . . . .	394
8.4.2	Orbitales atomiques et moléculaires dans l'approximation de Hartree . . . . .	396
8.4.3	Notations . . . . .	397
8.4.4	Énergie directe et énergie d'échange . . . . .	398
8.4.5	Approximation de Heitler-London : orbitales atomiques avec échange . . . . .	399
8.4.6	Approximation de Hund-Milliken : orbitales moléculaires avec échange . . . . .	402
8.4.7	Critiques et améliorations . . . . .	402
8.5	Extension aux autres molécules . . . . .	403
8.A	Appendice : Hamiltonien d'Heisenberg . . . . .	405
<b>9</b>	<b>Exciton</b>	<b>407</b>
9.1	Correspondance trou-électron . . . . .	408
9.1.1	Définition . . . . .	408
9.1.2	Énergie du trou . . . . .	409
9.1.3	Vecteur d'onde du trou . . . . .	410
9.2	L'exciton dans un modèle simple . . . . .	412
9.2.1	États liés . . . . .	414
9.2.2	États non liés . . . . .	419
9.3	L'exciton dans les semi-conducteurs réels . . . . .	419
9.4	Exciton à deux dimensions . . . . .	421
9.A	Appendice : Exciton piégé . . . . .	422

<b>10 Absorption</b>	<b>425</b>
10.1 Généralités . . . . .	425
10.1.1 Optique . . . . .	425
10.1.2 Hamiltonien . . . . .	426
10.1.3 Probabilité de transition . . . . .	427
10.1.4 Définition du coefficient d'absorption . . . . .	428
10.2 Semi-conducteur massif : absorption bande à bande . . . . .	429
10.2.1 Élément de matrice . . . . .	429
10.2.2 Coefficient d'absorption . . . . .	430
10.2.3 Transition directe interdite . . . . .	438
10.2.4 Transition indirecte . . . . .	439
10.2.5 Transition pseudo-directe . . . . .	442
10.3 Semi-conducteur massif : absorption des excitons . . . . .	442
10.3.1 Description des excitons . . . . .	442
10.3.2 Élément de matrice . . . . .	443
10.3.3 Cas des excitons libres . . . . .	445
10.3.4 Cas des excitons piégés . . . . .	448
10.4 Semi-conducteur à deux dimensions (plan quantique) . . . . .	449
10.4.1 Description du plan quantique . . . . .	449
10.4.2 Absorption . . . . .	450
10.5 Forces d'oscillateur . . . . .	451
<b>11 Énergie d'échange électron-trou et polariton excitonique</b>	<b>455</b>
11.1 L'origine de l'interaction d'échange électron-trou . . . . .	457
11.2 Énergie d'échange dans les excitons de Wannier . . . . .	461
11.2.1 Énergie d'échange d'exciton et énergie d'échange atomique	461
11.2.2 Cas où il n'y pas de couplage spin-orbite . . . . .	463
11.2.3 Cas où le couplage spin-orbite joue un rôle . . . . .	463
11.3 Complément sur les fonctions d'onde des excitons libres . . . . .	467
11.4 La séparation longitudinal-transverse des excitons . . . . .	468
11.4.1 Sommes dipolaires . . . . .	468
11.4.2 Aperçu sur la théorie d'Hopfield . . . . .	471
11.5 Forces d'oscillateur . . . . .	472
11.5.1 Exemples . . . . .	472
11.5.2 Semi-conducteur sous contrainte . . . . .	473
11.5.3 Polariton avec une seule masse de trou . . . . .	476
11.5.4 Polaritons lourds et légers . . . . .	481
<b>III Transport</b>	<b>485</b>
<b>12 La "Loi de Newton" des solides cristallins</b>	<b>487</b>
12.1 Ondes planes et fonctions de Bloch . . . . .	487
12.2 Moment cristallin . . . . .	488

12.3	Vitesse . . . . .	488
12.4	Accélération : “loi de Newton” . . . . .	489
12.5	Bande pleine et trou . . . . .	491
12.6	Masses effectives . . . . .	493
12.6.1	Masse effective de densité d’états . . . . .	493
12.6.2	Masse effective de mobilité . . . . .	496
<b>13</b>	<b>Influence d’un champ magnétique</b>	<b>503</b>
13.1	Effet Hall . . . . .	504
13.1.1	Principe de l’effet Hall . . . . .	504
13.1.2	Effet Hall à deux types de porteurs . . . . .	507
13.1.3	Rôle du temps de relaxation de la quantité de mouvement et magnéto-résistance . . . . .	509
13.1.4	Tenseur de conductivité . . . . .	512
13.2	Résonance cyclotron . . . . .	513
13.2.1	Principe . . . . .	513
13.2.2	Cas d’une masse anisotrope . . . . .	513
13.2.3	Rôle du temps de collision . . . . .	519
13.A	Appendice : Masse cyclotron de la bande de valence . . . . .	522
<b>14</b>	<b>Équation de Boltzmann</b>	<b>525</b>
14.1	Préliminaire : section efficace, temps de relaxation, libre parcours moyen . . . . .	525
14.2	Équation de Boltzmann monobande . . . . .	528
14.2.1	Présentation générale . . . . .	528
14.2.2	Calcul du temps de relaxation dans le cas élastique . . . . .	536
14.2.3	Exemple : ensemble de potentiels décorrélés d’impuretés ionisées . . . . .	537
14.3	Équation de Boltzmann multibande (Théorie de Siggia-Kwok) . . . . .	540
14.3.1	Exemple : cas de 2 bandes . . . . .	544
14.3.2	Mobilité des électrons de conduction . . . . .	544
14.3.3	Mobilité des trous de la bande de valence $\Gamma_8$ . . . . .	545
14.A	Appendice : Résultats utiles . . . . .	547
14.A.1	Quelques résultats mathématiques . . . . .	547
14.A.2	Quelques valeurs numériques . . . . .	548
<b>15</b>	<b>Interaction électron-phonon</b>	<b>549</b>
15.1	Préliminaires . . . . .	549
15.1.1	L’oscillateur harmonique . . . . .	549
15.1.2	Sommes . . . . .	550
15.2	Hamiltonien des phonons acoustiques . . . . .	551
15.3	Potentiel de déformation . . . . .	557
15.4	Temps de relaxation . . . . .	559
15.4.1	Semi-conducteur massif (à trois dimensions) . . . . .	559

15.4.2	Semi-conducteur à deux dimensions . . . . .	560
15.5	Semi-conducteur polaire . . . . .	562
<b>16</b>	<b>Transport dans les semi-conducteurs à deux dimensions</b>	<b>565</b>
16.1	Préliminaire . . . . .	565
16.1.1	Notations . . . . .	565
16.1.2	Transfourrées à deux dimensions . . . . .	565
16.1.3	Une autre écriture de la fonction de Fermi-Dirac . . . . .	566
16.1.4	Densité d'électrons en fonction de la température . . . . .	567
16.1.5	Coefficients de transmission . . . . .	568
16.2	Écrantage et constante diélectrique . . . . .	571
16.2.1	Semi-conducteur à trois dimensions . . . . .	571
16.2.2	Semi-conducteur à deux dimensions . . . . .	572
16.2.3	Constante diélectrique à température finie . . . . .	575
16.3	Transport "horizontal" : diffusion par des impuretés ionisées . . . . .	576
16.4	Transport "vertical" : courant tunnel . . . . .	578
16.4.1	Courant à travers une barrière . . . . .	578
16.4.2	Courant "à trois dimensions" . . . . .	582
16.4.3	Transport à travers une double barrière . . . . .	583
<b>IV</b>	<b>Annexes</b>	<b>587</b>
<b>A</b>	<b>Notations et relations utiles</b>	<b>589</b>
A.1	Notations générales . . . . .	589
A.2	Atome d'hydrogène . . . . .	591
A.3	Hamiltoniens dans les semi-conducteurs . . . . .	591
A.4	Représentations irréductibles . . . . .	592
A.5	Fonctions de base . . . . .	592
A.6	Éléments de matrice . . . . .	593
A.7	Hamiltonien sans spin . . . . .	593
A.8	Hamiltonien avec spin . . . . .	594
A.9	Relations entre les paramètres de Luttinger et les paramètres de Pidgeon-Brown . . . . .	595
A.10	Liens entre les paramètres de Luttinger et les paramètres de Dresselhaus-Kip-Kittel . . . . .	596
A.11	Relations liées au spin . . . . .	598
A.12	L'interaction d'échange électron-trou . . . . .	599
A.13	Conjuguée de Kramers . . . . .	600
A.14	Optique . . . . .	601

<b>B</b>	<b>Seconde quantification</b>	<b>603</b>
B.1	Notations . . . . .	604
B.2	Cas des fermions . . . . .	606
B.2.1	Définitions . . . . .	606
B.2.2	Opérateur à une particule . . . . .	607
B.2.3	Opérateurs de destruction et de création . . . . .	608
B.2.4	Opérateurs à deux particules . . . . .	611
B.2.5	Hamiltonien en seconde quantification . . . . .	612
B.2.6	Opérateurs de champ . . . . .	612
B.3	Cas des bosons . . . . .	614
B.3.1	Définitions . . . . .	614
B.3.2	Opérateurs de destruction et de création . . . . .	615
B.3.3	Opérateurs de champ . . . . .	616
B.4	En bref . . . . .	616
B.5	Exemples . . . . .	617
B.5.1	Opérateur nombre de particules . . . . .	617
B.5.2	Opérateur densité de particules . . . . .	617
B.5.3	Potentiel de Coulomb . . . . .	617
B.5.4	Opérateur courant . . . . .	618
B.5.5	Évolution du nombre d'occupation et du moment total . . . . .	620
<b>C</b>	<b>Transformée de Fourier en physique du solide</b>	<b>625</b>
C.1	Nomenclature . . . . .	625
C.2	Cas général . . . . .	625
C.3	En physique du solide . . . . .	626
C.4	Cas particuliers . . . . .	628
C.5	Transfourée temporelle . . . . .	628
<b>D</b>	<b>Constante diélectrique de Thomas-Fermi et Debye-Hückel</b>	<b>629</b>
<b>E</b>	<b>Relaxation de spin</b>	<b>633</b>
E.1	Généralités sur la relaxation de spin . . . . .	634
E.1.1	Les deux types de collision . . . . .	634
E.1.2	Les différents types d'interaction . . . . .	635
E.2	Processus de relaxation . . . . .	636
E.2.1	Relaxation due à la collision . . . . .	636
E.2.2	Relaxation entre les collisions . . . . .	639
E.2.3	Relaxation dans la bande de valence . . . . .	640
<b>F</b>	<b>Résistance tunnel</b>	<b>641</b>
F.1	Définition de la résistance tunnel . . . . .	641
F.2	Temps tunnel . . . . .	643
F.2.1	Introduction . . . . .	643
F.2.2	Fonction d'onde d'un puits quantique . . . . .	644

F.2.3	Calcul de $\delta E$ . . . . .	646
F.2.4	Temps tunnel . . . . .	647
F.3	Résistance tunnel . . . . .	648
F.3.1	Densité d'états à une dimension . . . . .	648
F.3.2	Lien entre le temps tunnel et la différence de potentiel . . . . .	648
F.3.3	Transmission quantique . . . . .	650
F.3.4	Explicitation du temps tunnel . . . . .	650
F.3.5	Calcul de la résistance tunnel . . . . .	651
<b>G</b>	<b>Fonction d'autocorrélation et approximation de Born</b>	<b>653</b>
G.1	Défauts de surface . . . . .	654
G.2	Fonction d'autocorrélation et approximation de Born . . . . .	654
G.2.1	Fonction d'autocorrélation . . . . .	654
G.2.2	Relation avec l'approximation de Born . . . . .	655
G.3	Surface rugueuse . . . . .	656
G.3.1	Description de la surface . . . . .	656
G.3.2	Temps de relaxation de la quantité de mouvement . . . . .	657
<b>H</b>	<b>Courant de probabilité et masse effective</b>	<b>661</b>
H.1	Fonction de conduction sans spin . . . . .	662
H.1.1	Masse effective et fonction d'onde . . . . .	662
H.1.2	Courant de probabilité . . . . .	662
H.2	Fonction de conduction avec spin . . . . .	663
H.2.1	Masse effective et fonction d'onde . . . . .	663
H.2.2	Courant de probabilité . . . . .	664
H.3	Conclusion . . . . .	665
<b>I</b>	<b>La matrice <math>30 \times 30</math></b>	<b>667</b>
I.1	Fonctions de base . . . . .	667
I.2	Éléments de matrice et notations . . . . .	668
I.3	La matrice $30 \times 30$ . . . . .	668
<b>J</b>	<b>Quelques coefficients de Clebsch-Gordan</b>	<b>681</b>
J.1	Table de compatibilité . . . . .	682
J.2	Table de multiplication . . . . .	684
J.3	Mode d'emploi . . . . .	685
J.4	Tables de coefficients de Clebsch-Gordan . . . . .	686
<b>K</b>	<b>Constantes</b>	<b>693</b>
K.1	Origine . . . . .	693
K.2	Constantes de base . . . . .	693
K.3	Constantes utiles dans les semi-conducteurs . . . . .	694
K.4	Equations aux dimensions . . . . .	695
	<b>Bibliographie</b>	<b>697</b>

**Index**

**709**