

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	V
Note au lecteur	XIV
Constantes physiques	XV
Classification périodique des éléments	XVI

1. Édifice cristallin et diffraction des rayonnements 1

Résumé de cours 1

Exercices 6

1 — Description de quelques édifices cristallins	6
2 — Masse volumique des cristaux	8
3 — Construction de quelques édifices cristallins à 1, 2 et 3 dimensions	9
4 — Rangées réticulaires	10
5 — Rangées et plans réticulaires	10
5 bis — Rangées et plans réticulaires (suite)	11
6 — Intersection de deux plans réticulaires	11
7 — Nœuds, rangées et plans du réseau	11
8 — Plans atomiques et indices de Miller : Application au Li	12
9 — Taux de remplissage	13
10 — Propriétés du réseau réciproque	15
10 bis — Distances entre plans réticulaires	16
11 — Angles entre plans réticulaires	17
12 — Volumes dans l'espace réciproque	17
13 — Réseau réciproque d'un réseau cubique à faces centrées	18
14 — Zones de Brillouin de réseaux c. c. et c. f. c.	19
15 — Diffraction des rayons X par une rangée atomique	20
16 — Largeur des taches de diffraction d'une rangée atomique de longueur finie	22
17 — Réseaux de Bravais à deux dimensions. Application au graphite	24
18 — Construction d'Ewald et facteur de structure d'une rangée	26
18 bis — Étude à incidence oblique d'une rangée triatomique	28
19 — Réseau réciproque, zone de Brillouin et construction d'Ewald d'un cristal à deux dimensions	29
20 — Diagrammes de diffraction et construction d'Ewald	32
21 — Sphère de résolution	33
22 — Coefficient de diffusion atomique ou facteur de forme	36
23 — Diffusion des rayons X par un électron. Commentaire	37

Problèmes	39
1 — Diffraction des rayons X par les cristaux cubiques	39
2 — Analyse d'un diagramme de diffraction	41
3 — Diffraction des électrons lents par une surface cristalline. Commentaires sur la diffraction et sur la cristallographie de surface	42
4 — Diffraction des électrons rapides appliquée à l'épitaxie et à la reconstruction des surfaces. Commentaires sur l'épitaxie	47
5 — Distinction entre alliage ordonné et alliage désordonné	52
6 — Étude radiocristallographie de l'alliage Au Cu	54
7 — Diffraction des neutrons par le diamant. Commentaires (Prix Nobel 1994)	55
8 — Diffraction par les structures modulées. Application aux ondes de densité de charge	57
9 — Facteur de structure de $\text{Ga}_x\text{Al}_{1-x}\text{As}$	59
10 — Facteur de structure des super-réseaux. Commentaire sur la caractérisation des super-réseaux	60
11 — Diffraction des rayons X et des neutrons. Probabilité de présence des électrons 3d du vanadium (Agrégation de Chimie 1976—partiel)	64
12 — Caractérisation des composés d'insertion du graphite par diffraction des rayons X Commentaire sur les composés d'insertion	69
Questions	74
2. Liaison cristalline et constantes élastiques	75
Résumé de cours	75
Exercices	81
1 — Compression d'un cristal ionique linéaire	81
2 — Constante de Madelung d'une rangée d'ions divalents	82
2 bis — Constante de Madelung d'une rangée d'ions $-2q$ et $+q$	83
3 — Énergie de cohésion d'un agrégat d'ions	84
4 — Constante de Madelung d'un réseau ionique plan	86
5 — Constante de Madelung d'ions sur une surface, une arête, un coin	88
6 — Constante de Madelung d'un ion au-dessus d'un cristal. Commentaires	90
7 — Constante de Madelung d'un ion dans une lame à faces parallèles	92
8 — Énergie de cohésion d'un cristal de Mg O	94
9 — Rayons ionique et stabilité des structures cristallines. Commentaires	95
10 — Potentiel Lennard Jones des cristaux de gaz rares	97
11 — Chimisorption atomique sur une surface métallique. Commentaires	98
12 — Anisotropie de la dilatation thermique des cristaux	101
13 — Traction et compression dans un milieu isotrope, Interrelations entre les S_{ij} , C_{ij} , E (module de Young), σ (coefficient de Poisson) λ et μ (coefficients de Lamé)	102
14 — Anisotropie élastique des cristaux hexagonaux	104
15 — Module de cisaillement et facteur d'anisotropie	106
16 — Vitesse des ondes élastiques dans les corps isotropes	108

Problèmes	110
1 — Cohésion de chlorure de sodium (d'après concours d'entrée aux ENS 1969)	110
2 — Cohésion et constantes élastiques de CsCl	114
3 — Interaction de Van der Waals-London. Énergie de cohésion des cristaux de gaz rares ..	117
4 — Vitesse de propagation des ondes élastiques dans les cristaux cubiques. Application à l'aluminium et au diamant	120
5 — Déformations liées à l'hétéro-épitaxie des semiconducteurs	123
Questions	125
3. Vibrations et chaleur spécifique du réseau	127
Résumé de cours	127
Exercices	132
1 — Dispersion des phonons longitudinaux le long d'une rangée atomique de type C-C=C-C=C	132
2 — Vibrations d'un cristal linéaire à 2 types d'atomes. Passage à la limite	134
2 bis — Vibrations d'un cristal linéaire ayant un motif triatomique	137
3 — Vibrations d'une rangée d'atomes identiques. Influence des seconds voisins	140
4 — Vibrations d'une rangée d'atomes identique. Influence des n ^{èmes} voisins	141
5 — Modes mous (d'après Agrégation Physique 1978—partiel)	142
6 — Anomalie de Kohn (idem)	144
7 — Phonons localisés sur une impureté	145
8 — Modes acoustiques de surface	147
9 — Vibrations transversales d'un réseau plan	148
10 — Absorption optique des cristaux ioniques dans l'infrarouge	152
11 — Chaleur spécifique d'un réseau linéaire	153
12 — Chaleur spécifique d'un cristal ionique linéaire	155
13 — Vibrations des atomes d'un métal alcalin. Température d'Einstein du sodium	157
14 — Vecteur d'onde et température de Debye dans les réseaux monoatomiques à 1, 2, et 3 dimensions	158
15 — Chaleur spécifique à 2 températures différentes	159
16 — Températures de Debye du germanium	160
17 — Densité d'états et chaleur spécifique d'un réseau monoatomique unidimensionnel : évaluation à partir de la relation de dispersion	160
18 — Chaleur spécifique d'un réseau plan. Commentaires portant sur les densités d'états et les chaleurs spécifiques des réseaux à une, deux et trois dimensions : tableau comparatif	162
19 — Densités d'états des phonons à 2 et 3d évaluées à partir de l'expression générale ...	166
20 — Énergie du point zéro et évolution de la population des phonons avec la température ..	168
20 bis — Énergie de vibration à 0(K) des réseaux à 1, 2 et 3d	170
21 — Moyenne quadratique du déplacement des atomes en fonction de T.	171

Problèmes	173
1 — Absorption dans l'infrarouge — Relation de Lyddane-Sachs et Teller. Commentaires ..	173
2 — Polaritons	177
3 — Dispersion des phonons longitudinaux et transversaux dans CsCl. Commentaire sur la dynamique cristalline et les vibrations du réseau	178
4 — Perfectionnement de la théorie de Debye. Détermination de θ_D à l'aide des constantes élastiques : application au lithium	183
5 — Chaleurs spécifiques à pression et à volume constants. Évaluation de la correction $C_p - C_v$ dans les solides	186
6 — Oscillations anharmoniques : dilatation et chaleur spécifique d'une rangée d'atomes	188
7 — Phonons dans le germanium et diffusion des neutrons (Prix Nobel 1994)	191
8 — Dispersion des phonons dans les couches de CuO_2	195
Questions	198

4. Électrons libres (métaux simples)

Résumé de cours	199
Exercices	203
1 — Électrons libres dans un système unidimensionnel. Passage de l'atome à la molécule et au cristal	203
2 — Métal unidimensionnel ; conditions aux limites périodiques	205
3 — Électrons libres dans une enceinte	207
4 — Conditions aux limites périodiques dans un édifice tridimensionnel	209
5 — États électroniques dans les amas métalliques. Influence de la taille des amas Commentaires	211
6 — États électroniques dans les agrégats métalliques. Influence de la forme	215
6 bis — Centre F dans les halogénures alcalins et effet Jahn-Teller (variante des ex. n°5 et 6)	216
7 — Énergie de Fermi (et température de Debye) d'objets de dimension(s) réduite(s) : C.L.P. et C.L.F	218
8 — Gaz de fermions	223
9 — Énergie de Fermi et dilation thermique	227
10 — Chaleur spécifique électronique du cuivre	228
11 — Densité des états électroniques à 1, 2 et 3 dimensions évaluée à partir de la formule générale	229
12 — Quelques propriétés physiques du lithium	231
13 — Énergie de Fermi, chaleur spécifique électronique et conductivité électrique d'un conducteur unidimensionnel. Commentaire	233
14 — Énergie de Fermi, chaleur spécifique d'un métal plan. Tableau comparatif portant sur les densités d'états et les chaleurs spécifiques électroniques des métaux à une, deux et trois dimensions	236

14 bis — variante de l'exercice n°14). Les électrons π du graphite	241
14 ter — Vecteur d'onde et énergie de Fermi (à 0K) de gaz d'électrons à 1, 2 et 3d. Comparaison avec l'énergie de vibration du réseau	243
15 — Tension superficielle des métaux. Commentaires	244
16 — Influence des impuretés et de la température sur la résistivité électrique des métaux. Règle de Matthiessen. Commentaires	247
17 — Influence de la densité des lacunes sur la résistivité des métaux	250
18 — Influence de la nature des impuretés sur la résistivité	251
19 — Une autre expression pour σ	252
20 — Effet de taille : Conductivité électrique des films métalliques. Commentaire	254
21 — Effet de peau anormal. Commentaires	256
22 — Paramagnétisme des électrons libres à 1, 2 et 3 dimensions Tableau comparatif précisant l'évolution de $g(E)$, $\chi(0)$, $\chi(T)$ et $E_F(T)$ dans les 3 cas	256
23 — Effet Hall quantique. Commentaire (Prix Nobel 1985)	262
24 — Calcul simplifié de la distance interatomique du module de rigidité et de l'énergie de Fermi d'un métal alcalin	264
25 — Pression et module de compression d'un gaz d'électrons. Application au sodium ..	266
26 — Effet d'écran	267
27 — Émission thermoélectronique : Formule de Dushman. Commentaires	270
28 — Émission thermoélectronique : largeur énergétique des faisceaux émis	273
28 bis — Émission thermoélectronique à deux dimensions	275
29 — Pouvoir réflecteur des alcalins dans l'U.V.(variante simplifiée du problème n°5) ..	276
30 — Indice de réfraction des rayons X et réflexion totale à incidence rasante. Commentaire sur la focalisation des rayons X	279
31 — Réflectivité des métaux dans l'infrarouge. Relation de Hagen-Rübens	280
Problèmes	281
1 — Énergie superficielle des métaux normaux : Modèle de Breger et Zukovitski	281
2 — Conductivité électrique en continu. Influence d'un champ magnétique	284
3 — Microscope tunnel. Commentaire (prix Nobel 1986)	289
4 — Émission de photoélectrons X ; structures fines d'absorption X (EXAFS) ; émission Auger et émission X. Commentaires (prix Nobel 1981)	293
5 — Pertes d'énergie caractéristiques et pouvoir réflecteur des alcalins dans l'ultraviolet modèle de Drude. Commentaires sur les relations de Kramers et Kronig, le pouvoir réflecteur et la constante diélectrique, les pertes d'énergies caractéristiques et les plasmons	299
6 — Dispersion des plasmons de surface	307
7 — Supraconducteurs. Équation de London et effet Meissner. Commentaire sur les supraconducteurs (Prix Nobel 1987)	312
8 — Densité des paires de Cooper dans les supraconducteurs métalliques	315
9 — Relation de dispersion des ondes électromagnétiques dans les supraconducteurs métalliques à 2 fluides	316
Questions	318

5. Théorie des bandes (autres métaux, semiconducteurs, isolants)

Résumé de cours	319
Exercices	325
1 — Électrons « s » liés dans une rangée d'atomes identiques	325
2 — Électrons « s » liés dans un réseau plan	327
2 bis — Structure de bande des supraconducteurs à haute température. Influence des seconds voisins. Commentaires	330
3 — Liaisons fortes dans un réseau cubique simple	334
3 bis — Liaisons fortes dans les réseaux c.c. et c.f.c.	338
4 — Dimérisation d'une chaîne linéaire	340
5 — Conducteurs et isolants	343
5 bis — Électrons presque libres dans un réseau rectangulaire	345
6 — Changements de phase dans les alliages de substitution. Application au CuZn	347
7 — Pourquoi le nickel est ferromagnétique et le cuivre ne l'est pas	350
8 — Énergie de cohésion des métaux de transition. Commentaires	352
9 — Semi-métaux. Commentaires	354
10 — Étude élémentaire d'un semiconducteur intrinsèque	357
11 — Densité des porteurs et bande interdite	359
12 — Conductivité des s.c. a la limite de la dégénérescence	360
13 — Densité des porteurs dans un semiconducteur dégénéré	361
14 — L'arséniure de gallium semi-isolant	361
15 — Conductivité électrique intrinsèque et extrinsèque de quelques semiconducteurs ..	363
16 — Orbites d'impuretés	364
17 — Ionisation des donneurs	365
18 — Effet Hall dans un semiconducteur ayant deux types de porteurs	365
19 — Magnétorésistance transversale d'un semiconducteur ayant deux types de porteurs	367
20 — Exciton	370
21 — Structure de bande et propriétés électriques des composés III-V à bande interdite directe. Trous légers et trous lourds. Commentaire sur la structure de bande des semiconducteurs	371
22 — Chaleur spécifique électronique des semiconducteurs intrinsèques	374
23 — Chaleur spécifique et bande interdite des supraconducteurs métalliques	376
24 — Effet Burnstein-Moss	377
25 — Bande interdite, transparence et constante diélectrique de cristaux ioniques Commentaires	378
26 — Dispersion de la lumière : formule de Sellmeier	382
27 — Retour sur l'indice optique des rayons X et leur coefficient d'absorption	383
28 — Absorption optique et couleurs des semiconducteurs et des isolants Commentaire	385
29 — Propriétés optoélectroniques des semiconducteurs III-V. Commentaire	387
30 — Diode Gunn. Commentaire sur l'effet Gunn	388

Problèmes	392
1 — Modèle de Krönig et Penney. Potentiel en créneaux dans un réseau unidimensionnel	392
2 — Électrons presque libres dans un réseau unidimensionnel	396
3 — Semiconducteur unidimensionnel : chaleur spécifique électronique	401
4 — Conductivité électrique du germanium et du silicium intrinsèques et dopés (Concours Agrégation Physique 1962)	404
5 — Semiconducteurs dégénérés et non dégénérés	410
6 — Propriétés optiques des semiconducteurs et des isolants. Commentaires	413
7 — La jonction p.n	420
8 — Le transistor à jonctions (concours d'entrée aux ENS 1975 -partiel)	426
9 — États électroniques dans les puits quantiques et les super-réseaux semiconducteurs Commentaires	430
9 bis — États électroniques dans les puits quantiques à deux dimensions	434
10 — Structure de bande et propriétés optiques du graphite dans l'ultra- violet	436
Questions	442
Réponses aux questions	445
Bibliographie	453
Index alphabétique	455