

TABLE DES MATIÈRES

Avant-propos	5
Mode d'emploi	6
Remerciements	6
Chapitre 1. Introduction	7
1.1. Conducteurs et isolants. Diélectriques	7
1.2. Polarisation linéaire isotrope et anisotrope et polarisation non linéaire ..	8
1.3. Phénomènes de couplage	9
1.4. Plan de l'ouvrage	10
Références	10
Chapitre 2. Rappels d'électrostatique du vide	11
2.1. Loi de Coulomb	11
2.2. Champ d'une distribution de charges	12
2.3. Potentiel	12
2.4. Signification du potentiel	13
2.5. Potentiel d'une distribution donnée de charges	13
2.6. Induction électrique dans le vide. Théorème de Gauss	13
2.7. Discontinuité du champ et de l'induction à la traversée d'une surface chargée	14
2.8. Equation de Poisson	15
2.9. Equation de Laplace	15
2.10. Les différents types de problèmes rencontrés en électrostatique du vide	15
2.11. Champ d'un plan uniformément chargé	17
2.12. Champ de deux plans parallèles uniformément chargés	17
2.13. Densité d'énergie électrostatique	18
2.14. Champ d'une sphère uniformément chargée en volume	18

2.15. Sphère uniformément chargée en surface	19
2.16. Dipôle : définition, champ créé, force et couple subis par un dipôle dans un champ	20
2.16.1. Notion de dipôle	20
2.16.2. Potentiel et champ créés par un dipôle	20
2.16.3. Dipôle associé à un ensemble neutre de charges	22
2.16.4. Développement le plus général du potentiel créé par un ensemble quelconque de charges	23
2.16.5. Force et couple agissant sur un dipôle – Energie d'interaction ..	23
2.17. Condensateur plan	24
2.18. Condensateur cylindrique. Capacité linéique	25
2.19. Conducteur massif et conducteur creux	26
2.20. Pression électrostatique	26
Exercices et problèmes	27
Chapitre 3. Le couplage électromagnétique	31
3.1. Le couplage électromagnétique dans le vide : équations de Maxwell	31
3.2. Equations de Helmotz	32
3.3. Propagation électromagnétique : l'onde plane dans le vide	33
3.3.1. Modèle de nappe	33
3.3.2. Vitesse de propagation électromagnétique	34
3.3.3. Impédance d'onde	34
3.3.4. Amplitude et énergie rayonnées par une nappe de courant – Vecteur de Poynting	35
3.3.5. Nappe de champ. Plan conducteur parfait	39
3.3.6. Réflexion totale en incidence normale sur un plan conducteur	40
3.4. Onde plane en régime sinusoïdal	42
3.5. Diffraction et guidage	43
3.6. Guide biplaque	45
3.7. Lignes	47
3.7.1. Mode guidé par une ligne : profil transverse du mode	47
3.7.2. Ondes de tension, de charge et de courant. Impédance caractéristique	48
3.7.3. Ondes de tension et de courant progressive et régressive sur une ligne	49

3.7.4. Coefficient de réflexion. Impédance ramenée	50
3.7.5. Ligne coaxiale	51
3.8. Guides d'ondes : Guide rectangulaire, les modes TE	52
Exercices	56
Références	59
Chapitre 4. Electrostatique des milieux polarisés	61
4.1. Le modèle continu	61
4.2. La polarisation	62
4.3. Charges de surface et de volume	63
4.4. Champ en présence de charges libres et de milieux polarisés. Induction dans un milieu polarisé	65
4.5. Relation de passage d'un milieu à l'autre	66
4.6. Quelques exemples de champs produits par les milieux polarisés. Notion de champ dépolarisant	66
4.6.1. Plaque infinie uniformément polarisée	66
4.6.2. Sphère uniformément polarisée. Coefficient de champ dépolarisant	67
4.6.3. Ellipsoïde uniformément polarisé. Tenseur de coefficient de champ dépolarisant	68
4.6.4. Energie de champ dépolarisant	69
4.6.5. Champ dans une cavité sphérique creusée dans un milieu infini uniformément polarisé	69
4.6.6. Champ dans une cavité sphérique creusée dans un ellipsoïde uniformément polarisé	70
Complément. Autres approches de la polarisation et du champ créé par celle-ci	70
C4.1. Approche continue	70
C4.1.1. La polarisation	70
C4.1.2. Potentiel V_P et champ \mathbf{E}_P créé par un milieu de polarisation connue \mathbf{P}	70
C4.2. Approche discrète	71
C4.2.1. La polarisation	71
C4.2.2. Potentiel V_P et champ \mathbf{E}_P créé par un milieu de polarisation connue \mathbf{P}	71
Exercices	72
Références	74

Chapitre 5. Diélectriques linéaires : Phénoménologie	75
5.1. Diélectriques linéaires isotropes : susceptibilité et constante diélectrique statiques	75
5.2. Diélectriques linéaires anisotropes : susceptibilité et constante diélectrique tensorielles	76
5.3. Equations de l'électrostatique dans un diélectrique linéaire isotrope	78
5.4. Etude de plusieurs cas	78
5.4.1. Condensateur plan rempli de diélectrique. Signification de ϵ_r	78
5.4.2. Plaque diélectrique soumise à un champ perpendiculaire aux faces	79
5.4.3. Sphère diélectrique soumise à un champ uniforme	80
5.4.4. Mélange de diélectriques. Approximation du milieu effectif	82
5.5. Susceptibilité et constante diélectrique complexes	84
5.5.1. Signification de la susceptibilité et de la constante diélectrique complexes	85
5.5.2. Susceptibilité et constante diélectrique complexes, description complète des propriétés dynamiques	86
5.5.3. Relations de Kramers Kronig	86
5.5.4. Diélectrique conducteur	87
5.6. Equations de l'électromagnétisme dans un diélectrique linéaire et isotrope	88
5.6.1. Onde plane dans un diélectrique linéaire isotrope	88
5.6.2. Onde plane dans un métal : effet de peau	90
5.6.3. Ondes guidées dans un diélectrique isotrope	91
5.7. Mesure de la constante diélectrique et de la susceptibilité complexes ...	92
5.7.1. Méthodes de basses fréquences	92
5.7.2. Méthodes de lignes et de guides	97
5.7.3. Méthodes quasi-optiques et optiques	102
5.8. Applications des diélectriques linéaires	103
5.8.1. Condensateurs	103
5.8.2. Résonateurs et guides diélectriques. Fibres optiques	104
5.8.3. Chauffage par pertes diélectriques	106
Exercices	106
Références	112

Chapitre 6. Modèles microscopiques de diélectriques linéaires	113
6.1. Mécanismes de polarisation	113
6.1.1. Polarisation ionique	114
6.1.2. Polarisation électronique	114
6.1.3. Polarisation orientationnelle	115
6.2. Polarisabilité	116
6.3. Réseau de particules polarisables : le problème de Clausius–Mossotti ..	117
6.3.1. Polarisation du réseau	117
6.3.2. Réseau de particules ponctuelles polarisables	117
6.3.3. Champ microscopique. Champ macroscopique. Champ local	118
6.3.4. Champ local de Lorentz	118
6.3.5. Susceptibilité et constante diélectrique d'un réseau de particules polarisables. Relation de Clausius–Mossotti	121
6.3.6. Relation de Clausius–Mossotti généralisée	121
6.4. Susceptibilité statique des cristaux ioniques	122
6.5. Couplage entre polarisations ionique et électronique	125
6.6. Dynamique de la polarisation dans un cristal ionique	126
6.6.1. Mouvement libre	127
6.6.2. Susceptibilité et constante diélectrique complexes	128
6.6.3. Effet, sur le spectre de la susceptibilité, du couplage à la polarisation électronique	130
6.6.4. Modes électrostatiques uniformes transverse et longitudinal d'une plaque. Modes uniformes d'un ellipsoïde	133
6.6.5. Modes propres non uniformes	134
6.6.6. Origine de l'amortissement de la résonance de réseau	138
6.6.7. Cristaux ioniques complexes	139
6.7. Susceptibilité électronique	140
6.7.1. Dispersion dans la bande de transparence des cristaux purs. Relation de Sellmeier	143
6.7.2. Raies d'absorption des cristaux impurs ou dopés	144
6.7.3. Retour sur la susceptibilité des cristaux ioniques. Spectre diélectrique complet	146
6.8. Polarisation orientationnelle	147
6.8.1. Composés à molécules polaires	147

6.8.2. Polarisation orientationnelle associée aux défauts ponctuels. Modèle de Breckenridge	150
6.9. Spectre diélectrique complet d'un diélectrique réel. Des fréquences radioélectriques aux fréquences optiques	153
6.10. Remarque sur le rôle de la température	154
Compléments	156
C6.1. Etat de référence dans un cristal ionique	156
C6.2. Relations de dispersion des modes transverses dans un cristal cubique binaire	157
C6.3. Modèle de Onsager	157
Exercices	160
Références	163
Chapitre 7. Optique cristalline	165
Première partie : Optique linéaire	165
7.1. Propagation d'une onde électromagnétique dans un diélectrique	165
7.2. Milieux isotropes	166
7.2.1. Indice de réfraction	166
7.2.2. Interface entre deux milieux	167
7.3. Milieux anisotropes. Biréfringence	174
7.3.1. Modes propres de propagation dans un milieu anisotrope	174
7.3.2. Réfraction dans les milieux anisotropes	180
7.3.3. Applications des diélectriques biréfringents	181
7.4. Milieux chiraux. Activité optique ou pouvoir rotatoire	186
Deuxième partie : Optique non-linéaire	188
7.5. Introduction	188
7.6. Faibles non-linéarités d'origine électronique	190
7.6.1. Doublage de fréquence. Accord de phase	191
7.6.2. Origine microscopique des non-linéarités électroniques	193
7.6.3. Applications de l'optique non-linéaire	196
Compléments	196
C7.1. Généralités sur la lumière polarisée	196
C7.2. Tenseur de permittivité équivalent	198
Exercices	200

Références	202
Chapitre 8. Ferroelectricité	203
8.1. Le mécanisme displacif	204
8.1.1. Les modes d'instabilité	204
8.1.2. Transition ferroélectrique	241
8.2. Mécanisme de mise en ordre spontanée de moments	215
8.3. Théorie thermodynamique	216
8.4. Effets du couplage électromécanique	222
8.5. Matériaux ferroélectriques et applications	224
Complément. Interaction électrostatique entre plans cristallins homologues dans un cristal ionique	227
Exercices	230
Références	235
Chapitre 9. Piézoélectricité	237
9.1. Rappels d'élasticité	237
9.1.1. Déformation	238
9.1.2. Contrainte	241
9.1.3. Loi de Hooke	243
9.1.4. Energie élastique	245
9.2. Phénoménologie de l'effet piézoélectrique	246
9.2.1. Matrices piézoélectriques	247
9.2.2. Formulation thermodynamique	248
9.2.3. Caractérisation des matériaux piézoélectriques : cas des céramiques	251
9.3. Panorama des matériaux piézoélectriques usuels et de leurs applications	259
9.3.1. Le quartz et les applications d'horloge	259
9.3.2. Les céramiques ferroélectriques polarisées (PZT) et les applications à la génération et la détection d'ultrasons	261
9.3.3. Autres matériaux piézoélectriques et autres applications	267
Exercices	269
Références	271

Chapitre 10. Effets de couplage dans les diélectriques	273
10.1. Effets magnétoélectriques	273
10.1.1. Effet magnétoélectrique statique	273
10.1.2. Effet magnétoélectrique dynamique	274
10.2. Effet électro-optique linéaire	278
10.2.1. Formulation pratique générale de l'effet électro-optique	279
10.2.2. Effets électro-optiques du cristal bloqué et du cristal libre	280
10.2.3. Effet électro-optique dans les classes cubiques $\bar{4}3m$ et 23	280
10.2.4. Effet électro-optique dans les classes $4mm$, $6mm$ et ∞m	282
10.2.5. Effet électro-optique dans la classe $3m$	283
10.3. Origine microscopique de l'effet électro-optique	284
10.3.1. Relation avec la non linéarité diélectrique	284
10.3.2. L'effet électro-optique dans les cristaux ioniques	285
10.4. Applications de l'effet électro-optique	286
10.4.1. Modulateur électro-optique	286
10.4.2. Porte optique ou modulation tout ou rien	286
10.4.3. Modulateur linéaire d'amplitude	287
10.5. Effets magnéto-optiques	290
10.5.1. Effet Faraday	290
10.5.2. Interprétation macroscopique de l'effet Faraday	290
10.5.3. Modes propres de propagation à polarisation circulaire. Biréfringence circulaire	291
10.5.4. Origines microscopiques de l'effet Faraday	293
10.5.5. Applications de l'effet Faraday	294
10.6. Autres effets de couplages magnétiques ou électriques	295
10.6.1. Effet Kerr	295
10.6.2. Effet Cotton–Mouton	296
10.6.3. Effet électro-optique quadratique	296
10.7. Effet photoélastique	298
Exercices	300
Références	302
Solutions des exercices	303

Annexes	351
Annexe 1. Equations de Maxwell	351
Annexe 2. Symétrie et direction du champ	352
Annexe 3. Convention adoptée pour la représentation complexe d'une onde	354
Annexe 4. Constantes universelles	354
Annexe 5. Tableau périodique des éléments	355
Annexe 6. Principaux symboles utilisés et unités	356
Annexe 7. Tableau des 32 classes cristallines	357
Annexe 8. Echelles des fréquences et longueurs d'onde	358
Bibliographie	359
Index	361
Table des matières	367