

# TABLE DES MATIÈRES

<b>Avant-propos</b> .....	5
<b>Mode d'emploi</b> .....	6
<b>Remerciements</b> .....	6
<b>Chapitre 1. Introduction</b> .....	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
<b>Chapitre 2. Rappels d'électrostatique du vide</b> .....	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
<b>Chapitre 3. Le couplage électromagnétique .....</b>	<b>31</b>
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
<b>Chapitre 4. Electrostatique des milieux polarisés .....</b>	<b>61</b>
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
<b>Complément. Autres approches de la polarisation et du champ créé par celle-ci</b>	<b>70</b>
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

<b>Chapitre 5. Diélectriques linéaires : Phénoménologie</b>	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 $\epsilon_r$	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

<b>Chapitre 6. Modèles microscopiques de diélectriques linéaires</b> .....	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
<b>Compléments</b> .....	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
<b>Chapitre 7. Optique cristalline</b> .....	165
<b>Première partie : Optique linéaire</b> .....	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
<b>Deuxième partie : Optique non-linéaire</b> .....	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
<b>Compléments</b> .....	196
C7.1. Généralités sur la lumière polarisée .....	196
C7.2. Tenseur de permittivité équivalent .....	198
Exercices .....	200

Références .....	202
<b>Chapitre 8. Ferroelectricité</b> .....	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
<b>Complément.</b> Interaction électrostatique entre plans cristallins homologues dans un cristal ionique .....	227
Exercices .....	230
Références .....	235
<b>Chapitre 9. Piézoélectricité</b> .....	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

<b>Chapitre 10. Effets de couplage dans les diélectriques</b> .....	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 $\infty m$ .....	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
<b>Solutions des exercices</b> .....	303

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