
Table des matières

Avant-propos	iii
1 Introduction à l'électromagnétisme	1
1.1 Contexte théorique : les champs et le lagrangien	1
1.2 4-potentiel A^μ	1
1.3 Équations de Maxwell	3
1.4 Analyse des équations de Maxwell dans le cas stationnaire	4
1.4.1 Les sources du champ	4
1.4.2 Équation de Maxwell-Gauss : sources du champ électrique	5
1.4.3 Équation de Maxwell-flux : absence de sources magnétiques	5
1.4.4 Équation de Maxwell-Ampère : évolution du champ électrique	5
1.4.5 Équation de Maxwell-Faraday : évolution du champ magnétique	6
1.5 Des champs aux potentiels	7
1.5.1 Cas des sources stationnaires	8
1.6 Charges élémentaires	8
Exercices et corrigés	8
2 L'équation de Poisson	11
2.1 Généralités	11
2.1.1 Propriété de la moyenne	11
2.1.2 Théorème de Green	11
2.1.3 Théorème de réciprocité (pour les conducteurs)	12
2.1.4 Unicité de la solution	12
2.2 Fonctions de Green	13
2.2.1 Symétrie des fonctions	13
2.2.2 Expressions intégrales du potentiel	14
2.3 Équations intégrales des fonctions de Green	16
2.4 Équivalence électrostatique : le potentiel	19
Exercices et corrigés	19
3 Électrostatique des conducteurs	25
3.1 Relation d'Ohm dans les conducteurs	25
3.2 Équilibre électrostatique des conducteurs	26
3.2.1 Champ et charge dans un conducteur : régime stationnaire	26
3.2.2 Lignes de champ	26
3.3 Régimes non-stationnaires dans un conducteur	26

3.3.1	Courants de surface	26
3.3.2	Composante tangentielle de \mathbf{E}	27
3.3.3	Composante normale de \mathbf{E}	27
3.3.4	Temps de relaxation électrostatique	28
3.3.5	Temps de relaxation des courants	28
3.4	Coefficients d'influence	28
3.4.1	Linéarité	28
3.4.2	Symétrie des coefficients d'influence	30
3.4.3	Influence totale	30
3.5	Expression du champ par des intégrales de surface	31
3.6	Équivalence électrostatique	32
	Exercices et corrigés	33
4	Électrostatique des milieux diélectriques	37
4.1	Moment dipolaire d'un système de charges	37
4.2	Diélectrique neutre	38
4.3	Charges de surface et de volume	38
4.4	Vecteur induction diélectrique	39
4.5	Relations de constitution	40
4.5.1	Milieux isotropes	40
4.5.2	Milieux anisotropes (cristaux)	40
4.6	Champ local	40
4.7	Symétrie du tenseur diélectrique	41
4.7.1	Modèle classique de l'électron élastiquement lié	42
4.7.2	Modèle quantique	42
4.8	Conditions aux limites	42
4.9	Forces dans les diélectriques	43
4.10	Condensateurs et capacités	44
	Exercices et corrigés	44
5	Solution de quelques problèmes d'électrostatique	51
5.1	Problèmes à deux dimensions	51
5.1.1	Source ponctuelle	51
5.1.2	Méthode des images : plan conducteur et cylindre	52
5.1.3	Méthodes analytiques	53
5.1.4	Méthodes numériques	53
5.2	Problèmes à trois dimensions	54
5.2.1	Méthode des images	54
5.2.2	Formule de Poisson (sphère)	54
5.2.3	Pointe	55
5.A	Annexe : effet de pointe	55
	Exercices et corrigés	56

6	Magnétostatique	63
6.1	Potentiel vecteur d'un courant	63
6.2	Moment magnétique	64
6.2.1	Mouvement classique dans un champ magnétique uniforme	65
6.2.2	Boucle macroscopique (moteur)	65
6.2.3	Précession du moment magnétique orbital d'un électron	66
6.2.4	Mouvement de translation	67
6.2.5	Champ magnétique d'un moment magnétique	67
6.3	Équivalence magnétique	67
6.4	Origine microscopique et utilisations	68
	Exercices et corrigés	68
7	Milieux magnétiques	75
7.1	Vecteur de magnétisation	75
7.2	Potentiel vecteur	75
7.2.1	Milieu magnétique isotrope	77
7.2.2	Milieu magnétique anisotrope (non ferromagnétique)	77
7.2.3	Limite des très grands champs	77
7.3	Conditions aux limites	77
7.3.1	Continuité normale	77
7.3.2	Continuité tangentielle	78
7.4	Types de milieux magnétiques	78
7.4.1	Milieux ferromagnétiques	78
7.4.2	Milieux antiferromagnétiques	79
7.4.3	Milieux paramagnétiques	79
7.4.4	Milieux diamagnétiques	79
	Exercices et corrigés	80
8	Énergie électrostatique d'un système de conducteurs	87
8.1	Introduction	87
8.2	Cas d'un conducteur unique	87
8.3	Système de conducteurs	88
8.4	Conservation de l'énergie électrostatique	88
8.5	Énergie électrostatique	89
8.6	Symétrie du tenseur diélectrique	89
8.7	Forces électrostatiques	90
	Exercices et corrigés	90
9	Énergie magnétique	95
9.1	Énergie fournie par la variation des courants	95
9.2	Expression de l'énergie magnétique à l'aide du champ	96
9.3	Symétrie du tenseur de perméabilité	97
9.4	Self-induction	97
	Exercices et corrigés	98

10	Mouvement des charges	103
10.1	Lagrangien d'interaction	103
10.2	Équations du mouvement	103
10.3	Mouvement d'une charge dans un champ magnétique	104
10.4	Appareillages	104
10.5	Force pondéromotrice	104
	Exercices et corrigés	105
11	Énergie et impulsion du champ	111
11.1	Énergie transférée aux charges	111
11.2	Tenseur énergie-impulsion du champ	113
11.2.1	Interaction avec des charges libres : densité d'impulsion de Minkowski	113
11.2.2	Densité d'impulsion de Maxwell dans le vide	115
11.2.3	Interaction avec le milieu : densité de force et tenseur EM	115
11.2.4	Interaction avec les dipôles du milieu : densité d'impulsion d'Abraham	116
11.2.5	Interaction avec les dipôles du milieu : densité d'impulsion de Kelvin	117
11.3	Pression de radiation	117
11.4	Symétrie des susceptibilités	118
11.5	La controverse	119
	Exercices et corrigés	119
12	Champs rayonnés par les courants	127
12.1	Propagation des potentiels	127
12.1.1	Équations de propagation	127
12.1.2	Relations entre les potentiels et les sources	128
12.1.3	Propagation des champs	128
12.2	Rayonnement de dipôles magnétiques et électriques	129
12.2.1	Dipôles magnétiques	129
12.2.2	Dipôles électriques	131
12.3	Composantes monochromatiques du champ	133
12.4	Champs à grande distance des sources	133
12.5	L'onde plane monochromatique	135
12.6	Théorème de Lorentz	136
	Exercices et corrigés	138
13	Champ électromagnétique d'une charge ponctuelle	145
13.1	Introduction	145
13.2	4-potentiel : méthode temporelle	145
13.3	4-potentiel : méthode spatiale	146
13.3.1	Variables retardées et potentiels	146
13.4	Champs	147
13.5	Mouvements particuliers	148
13.5.1	Mouvement uniforme	148
13.5.2	Mouvement accéléré	148
13.5.3	Mouvement périodique	148
13.6	Formule de Larmor non-relativiste	149
13.7	Formule de Larmor relativiste	149

13.8 Réaction de rayonnement et paradoxes	150
Exercices et corrigés	155
14 Équations de Maxwell dans les milieux homogènes	161
14.1 Relations de Maxwell « exactes »	161
14.2 Propagation dans un diélectrique homogène isotrope	162
14.3 Relations de constitution	163
14.4 Milieux diélectriques et magnétiques anisotropes	164
14.5 Milieux bi-isotropes	165
14.6 Symétrie de renversement du temps	166
14.7 Propagation dans un milieu chiral bi-isotrope	166
14.8 Symétrie de parité	168
14.9 Modèle moléculaire	168
14.10 Matrices de constitution dans les milieux optiquement actifs	168
14.11 Milieu absorbant : tenseur diélectrique non hermitien	169
14.12 Effet Faraday	170
14.13 Limites à haute fréquence	170
14.13.1 Tenseur diélectrique	171
14.13.2 Perméabilité magnétique	171
14.14 Équations du champ dans les conducteurs isotropes	171
Exercices et corrigés	172
15 Antenne linéaire infinie	179
15.1 Équations à l'intérieur de l'antenne	179
15.2 Équations à l'extérieur de l'antenne	181
15.3 Composantes transverses	182
15.4 Conditions aux limites à la surface	183
Exercices et corrigés	185
16 Émission dipolaire d'une antenne	187
16.1 Courant dans une antenne linéaire	187
16.1.1 Équation intégrale de Pocklington	188
16.1.2 Équation intégrale de Hallén	188
16.2 Antenne dans l'approximation dipolaire	190
16.3 Rayonnement d'un dipôle magnétique	191
16.4 Théorème de réciprocité pour les antennes	192
Exercices et corrigés	193
17 Des ondes aux rayons	199
17.1 De l'onde aux trajectoires	199
17.1.1 Fonction de phase : iconale	199
17.1.2 Vecteur de Poynting	200
17.1.3 Principe de Fermat	201
17.2 Milieux anisotropes	202
Exercices et corrigés	204

18 Covariance des équations de Maxwell	207
18.1 Changement de repère galiléen	207
18.2 Tenseur énergie-impulsion du champ : formalisme général	210
18.2.1 Tenseur énergie-impulsion dans le vide	210
18.2.2 Tenseur énergie-impulsion dans un milieu matériel	211
18.3 Entraînement par le milieu	215
18.4 Changement général de coordonnées	215
18.5 Interprétation géométrique de la transformation	216
Exercices et corrigés	217
19 Réfraction dans un diélectrique homogène	225
19.1 Sources du champ réfracté	225
19.2 Théorème d'extinction d'Ewald-Oseen	227
19.3 Réfraction : coefficients de Fresnel	230
19.4 Diffusion par une charge libre : diffusion Thomson	232
19.5 Diffusion par une molécule neutre : diffusion Rayleigh	233
19.6 Section efficace de diffusion	234
Exercices et corrigés	235
20 Diffusion par un milieu diélectrique hétérogène	239
20.1 Milieux homogènes et hétérogènes	239
20.2 Diffusion par un gaz : diffusion Rayleigh	239
20.3 Diffusion par un liquide	242
20.3.1 Corrélations spatiales négligées	242
20.3.2 Influence des corrélations spatiales	243
Exercices et corrigés	244
21 Rayonnement Cerenkov	247
21.1 Phénomène observé	247
21.2 Spectre en fréquences	248
Exercices et corrigés	251
22 Rayonnement de transition	255
22.1 Introduction	255
22.2 Cas d'un plan conducteur	255
22.3 Solution directe par les 4-potentiels	256
22.4 Spectre en fréquences	257
22.5 Rayonnement de transition	259
22.5.1 Champ rayonné par la portion de trajectoire à l'air libre	259
22.5.2 Champ rayonné par la portion de trajectoire dans le diélectrique	260
Exercices et corrigés	262
23 Diffraction dans l'approximation de Kirchoff	263
23.1 Introduction	263
23.2 Équation de Helmholtz, diffraction par une ouverture	263
23.3 Approximation de Kirchoff	265
23.3.1 Amplitude du champ au point d'observation	265

23.3.2	Approximation de Fraunhofer, ouverture et demi-plan	265
23.3.3	Ombre et diffraction de Fresnel	267
	Exercices et corrigés	269
24	Principe de Huyghens vectoriel	273
24.1	Champ à l'extérieur d'une surface fermée	273
24.2	Courants et charges magnétiques équivalents	274
24.2.1	Condition de radiation	277
24.3	Équations intégrales de la diffusion	279
24.3.1	Diffusion par un Conducteur Électrique ou Magnétique Parfait	280
24.3.2	Diffusion par un diélectrique	281
24.4	Équivalence de Love	283
24.5	Équivalence de Schelkunoff	283
24.6	Ouverture dans un plan conducteur	285
24.A	Annexe : équations intégrales de Chu-Stratton	287
	Exercices et corrigés	289
25	Diffraction : solutions analytiques	297
25.1	Demi-plan conducteur en incidence normale : méthode de Lamb	297
25.2	Incidence normale	297
25.2.1	Champ électrique le long du bord du demi-plan	297
25.2.2	Champ électrique incident perpendiculaire au bord du demi-plan	299
25.2.3	Comportement au voisinage de la limite de l'ombre	300
25.3	Contribution des bords	301
25.4	Solution scalaire pour une source linéaire	302
25.5	Champ et courants pour une source linéaire	302
25.6	Équation intégrale pour un demi-plan et une source linéaire	303
25.6.1	Courants induits sur le demi-plan	303
25.7	Diffraction par un demi-plan	304
25.A	Annexe : incidence arbitraire	307
25.B	Annexe : diffraction 2D, méthode de la transformée de Fourier	309
25.C	Annexe : diffraction par un cylindre circulaire conducteur	311
25.C.1	Cas d'une onde incidente plane perpendiculaire à l'axe	311
25.C.2	Cas d'une source ponctuelle (2D), polarisation E_z	313
25.D	Annexe : solutions scalaires de l'équation de Helmholtz (3D)	314
25.D.1	Partie angulaire	314
25.D.2	Partie radiale	315
25.E	Annexe : diffraction scalaire par une sphère conductrice	316
25.F	Annexe : solutions vectorielles de l'équation de Helmholtz (3D)	317
25.G	Annexe : diffraction vectorielle par une sphère conductrice (3D)	318
25.H	Annexe : diffusion de Mie (sphère diélectrique)	320
	Exercices et corrigés	321

26	Approximation géométrique de la diffraction	325
26.1	Introduction	325
26.2	Arêtes	325
26.2.1	Rayons de surface : le cylindre	326
26.3	Cas du cylindre circulaire conducteur	328
26.3.1	Plan d'incidence perpendiculaire à l'axe : amplitude scalaire	330
26.4	Cas de la sphère conductrice	332
26.4.1	Amplitude scalaire	332
26.4.2	Amplitude vectorielle	333
26.A	Annexe : transformation de Watson	334
26.B	Annexe : fonctions de Hankel	335
26.C	Annexe : fonction d'Airy	337
	Exercices et corrigés	337
	Formulaire	341
	Bibliographie	343
	Index	349