

John David Jackson

2^e CYCLE • ÉCOLES D'INGÉNIEURS

Électrodynamique classique

Cours et exercices d'électromagnétisme



DUNOD

Table des matières

PRÉFACE	XVII
PRÉFACE À LA DEUXIÈME ÉDITION	XIX
PRÉFACE À LA PREMIÈRE ÉDITION	XXI
INTRODUCTION	1
1.1 Équations de Maxwell dans le vide, champs et sources	2
1.2 La loi du carré inverse ou le problème de la masse du photon	6
1.3 La superposition linéaire	9
1.4 Les équations de Maxwell macroscopiques	14
1.5 Conditions aux limites à l'interface entre deux milieux	17
1.6 Quelques remarques sur les idéalizations en électromagnétisme	20
RÉFÉRENCES ET SUGGESTIONS DE LECTURE	23
CHAPITRE 1 • INTRODUCTION À L'ÉLECTROSTATIQUE	25
1.1 La loi de Coulomb	25
1.2 Le champ électrique	26
1.3 Le théorème de Gauss	28
1.4 Forme différentielle du théorème de Gauss	30
1.5 Une autre équation de l'électrostatique. Le potentiel scalaire	31
1.6 Distributions surfaciques de charges et de dipôles. Discontinuités du champ et du potentiel électriques	33
1.7 Les équations de Poisson et de Laplace	36
1.8 Le théorème de Green	37
1.9 Unicité de la solution des problèmes de Dirichlet et de Neumann	39
1.10 Résolution formelle du problème du potentiel à l'aide des fonctions de Green	40

1.11	Énergie potentielle et densité d'énergie. Capacité	42
1.12	Résolution variationnelle des équations de Laplace et de Poisson	46
1.13	Méthode de relaxation et électrostatique bidimensionnelle	49
	RÉFÉRENCES ET SUGGESTIONS DE LECTURE	52
	PROBLÈMES	53
	CHAPITRE 2 • PROBLÈMES AUX LIMITES EN ÉLECTROSTATIQUE : I	60
2.1	La méthode des images	60
2.2	Charge ponctuelle en présence d'une sphère conductrice reliée au sol	61
2.3	Charge ponctuelle en présence d'une sphère conductrice isolée et chargée	64
2.4	Charge ponctuelle au voisinage d'une sphère conductrice maintenue à un potentiel fixe	66
2.5	Sphère conductrice dans un champ électrique uniforme	66
2.6	Fonction de Green pour la sphère. Solution générale du potentiel	68
2.7	Sphère conductrice aux hémisphères maintenus à des potentiels différents	69
2.8	Fonctions orthogonales; développements orthogonaux	71
2.9	Séparation des variables. Équation de Laplace en coordonnées rectangulaires	74
2.10	Un problème de potentiel à deux dimensions. Sommation d'une série de Fourier	76
2.11	Arêtes et coins bidimensionnels: champs et densités de charge	80
2.12	Introduction à la méthode des éléments finis	83
	RÉFÉRENCES ET SUGGESTIONS DE LECTURE	89
	PROBLÈMES	91
	CHAPITRE 3 • PROBLÈMES AUX LIMITES EN ÉLECTROSTATIQUE : II	101
3.1	L'équation de Laplace en coordonnées sphériques	101
3.2	Équation et polynômes de Legendre	103
3.3	Problèmes aux limites à symétrie azimutale	107
3.4	Champs électriques au voisinage d'une cavité ou d'une pointe coniques	110
3.5	Fonctions de Legendre associées et harmoniques sphériques $Y_{lm}(\theta, \phi)$	114
3.6	Théorème d'addition pour les harmoniques sphériques	117
3.7	Équation de Laplace en coordonnées cylindriques. Fonctions de Bessel	119
3.8	Problèmes aux limites en coordonnées cylindriques	124
3.9	Développement des fonctions de Green en coordonnées sphériques	126
3.10	Résolution des problèmes de potentiel à l'aide de fonctions de Green développées en coordonnées sphériques	130
3.11	Développement des fonctions de Green en coordonnées cylindriques	132

3.12	Développement des fonctions de Green en série de fonctions propres	135
3.13	Mixité des conditions aux limites; trou circulaire dans un plan conducteur	137
	RÉFÉRENCES ET SUGGESTIONS DE LECTURE	143
	PROBLÈMES	144
CHAPITRE 4 • MULTIPÔLES, ÉLECTROSTATIQUE DES MILIEUX MACROSCOPIQUES, DIÉLECTRIQUES		154
4.1	Développement multipolaire	154
4.2	Développement multipolaire de l'énergie d'une distribution de charge placée dans un champ externe	159
4.3	Introduction à l'électrostatique des milieux pondérables	161
4.4	Problèmes aux limites en présence de diélectriques	164
4.5	Polarisabilité moléculaire et susceptibilité électrique	169
4.6	Modèles de polarisabilité électrique	172
4.7	Énergie électrostatique des milieux diélectriques	175
	RÉFÉRENCES ET SUGGESTIONS DE LECTURE	179
	PROBLÈMES	180
CHAPITRE 5 • MAGNÉTOSTATIQUE, LOI DE FARADAY ET CHAMPS QUASI STATIQUES		185
5.1	Introduction et définitions	185
5.2	La loi de Biot et Savart	186
5.3	Équations différentielles de la magnétostatique. Théorème d'Ampère	190
5.4	Le potentiel vecteur	191
5.5	Potentiel vecteur et induction magnétique d'un courant circulaire	193
5.6	Champ magnétique d'une distribution de courant localisée. Moment magnétique	196
5.7	Force et moment agissant sur une distribution de courant localisée plongée dans une induction magnétique externe. Énergie de la distribution	199
5.8	Équations macroscopiques, conditions aux limites sur \mathbf{B} et \mathbf{H}	203
5.9	Méthodes de résolution de problèmes aux limites en magnétostatique	206
5.10	Sphère uniformément magnétisée	209
5.11	Sphère magnétisée placée dans un champ externe. Aimants permanents	211
5.12	Écran magnétique, couche sphérique de perméabilité μ dans un champ uniforme	213
5.13	Trou circulaire dans un plan parfaitement conducteur dont une face est baignée par un champ magnétique asymptotiquement tangentiel et uniforme	215
5.14	Méthodes numériques de détermination de champs magnétiques bidimensionnels	218
5.15	La loi de Faraday	220

5.16	Énergie du champ magnétique	224
5.17	Énergie, inductance propre et inductance mutuelle	227
5.18	Champs magnétiques quasi statiques dans les conducteurs ; courants de Foucault ; diffusion magnétique	230
	RÉFÉRENCES ET SUGGESTIONS DE LECTURE	236
	PROBLÈMES	237
CHAPITRE 6 • ÉQUATIONS DE MAXWELL, ÉLECTROMAGNÉTISME MACROSCOPIQUE, LOIS DE CONSERVATION		249
6.1	Courant de déplacement de Maxwell ; équations de Maxwell	250
6.2	Potentiel scalaire et potentiel vecteur	251
6.3	Transformation de jauge, jauge de Lorenz, jauge de Coulomb	253
6.4	Fonctions de Green de l'équation d'onde	255
6.5	Champs retardés : généralisations de Jefimenko ; formules d'Heaviside et de Feynman	258
6.6	Les équations macroscopiques de l'électromagnétisme	260
6.7	Théorème de Poynting : conservation de l'énergie et de la quantité de mouvement d'un système de particules chargées et de champs électromagnétiques	271
6.8	Théorème de Poynting et milieux dispersifs linéaires	275
6.9	Théorème de Poynting pour les champs harmoniques ; définition de l'impédance et de l'admittance en fonction des champs	277
6.10	Propriétés de transformation des champs et des sources électromagnétiques sous l'action d'une rotation, d'une inversion spatiale et d'une inversion temporelle	280
6.11	Sur le problème des monopôles magnétiques	286
6.12	Analyse de la condition de quantification de Dirac	289
6.13	Potentiels de polarisation ou vecteurs de Hertz	294
	RÉFÉRENCES ET SUGGESTIONS DE LECTURE	296
	PROBLÈMES	297
CHAPITRE 7 • ONDES PLANES ÉLECTROMAGNÉTIQUES ET PROPAGATION DES ONDES		309
7.1	Ondes planes dans un milieu non conducteur	310
7.2	Polarisations linéaire et circulaire ; paramètres de Stokes	313
7.3	Réflexion et réfraction d'ondes électromagnétiques à l'interface séparant deux diélectriques	318
7.4	Polarisation par réflexion et réflexion interne totale ; effet Goos-Hänchen	322
7.5	Dispersion en fréquence des diélectriques, des conducteurs et des plasmas	325
7.6	Modèle simplifié de propagation dans l'ionosphère et la magnétosphère	332
7.7	Ondes magnétohydrodynamiques	336
7.8	Superposition d'ondes unidimensionnelles ; vitesse de groupe	339

7.9	Étalement d'un signal à la traversée d'un milieu dispersif	343
7.10	Causalité entre D et E; relations de Kramers-Kronig	346
7.11	Arrivée d'un signal après la traversée d'un milieu dispersif	352
	RÉFÉRENCES ET SUGGESTIONS DE LECTURE	356
	PROBLÈMES	357
CHAPITRE 8 • GUIDES D'ONDES, CAVITÉS RÉSONANTES ET FIBRES OPTIQUES		370
8.1	Champs à la surface d'un conducteur	370
8.2	Cavités cylindriques et guides d'ondes	375
8.3	Guides d'ondes	378
8.4	Modes associés à un guide d'ondes rectangulaire	379
8.5	Propagation et atténuation de l'énergie dans un guide d'ondes	381
8.6	Perturbation des conditions aux limites	385
8.7	Cavités résonantes	387
8.8	Pertes de puissance dans une cavité. Facteur Q d'une cavité	390
8.9	La cavité Terre-ionosphère. Résonances de Schumann	393
8.10	La propagation multimode dans les fibres optiques	397
8.11	Les modes dans les guides d'ondes diélectriques	404
8.12	Développement en série de modes normaux; champs engendrés par une source dans un guide métallique creux	408
	RÉFÉRENCES ET SUGGESTIONS DE LECTURE	414
	PROBLÈMES	416
CHAPITRE 9 • SYSTÈMES RADIATIFS, CHAMPS ET RAYONNEMENTS MULTIPOLAIRES		427
9.1	Champs et rayonnement d'une source oscillante	427
9.2	Champs et rayonnement dipolaires électriques	430
9.3	Champs dipolaire magnétique et quadripolaire électrique	433
9.4	Antenne rectiligne à excitation centrale	437
9.5	Source ou ouverture dans un guide d'onde: développement multipolaire	440
9.6	Ondes sphériques solutions de l'équation d'onde scalaire	446
9.7	Développement multipolaire des champs électromagnétiques	450
9.8	Propriétés des champs multipolaires; énergie et moment cinétique du rayonnement multipolaire	453
9.9	Distribution angulaire du rayonnement multipolaire	458
9.10	Sources de rayonnement multipolaire; moments multipolaires	460
9.11	Rayonnement multipolaire dans les atomes et les noyaux	463

9.12 Rayonnement multipolaire d'une antenne rectiligne à excitation centrale	465
RÉFÉRENCES ET SUGGESTIONS DE LECTURE	470
PROBLÈMES	471
CHAPITRE 10 • DIFFUSION ET DIFFRACTION	478
10.1 Diffusion aux grandes longueurs d'onde	479
10.2 Théorie perturbative de la diffusion, explication du bleu du ciel par Rayleigh, diffusion par les gaz et les liquides, atténuation dans les fibres optiques	485
10.3 Développement en ondes sphériques d'une onde plane vectorielle	494
10.4 Diffusion d'ondes électromagnétiques par une sphère	496
10.5 Théorie scalaire de la diffraction	501
10.6 Équivalents vectoriels de l'intégrale de Kirchhoff	506
10.7 Théorie vectorielle de la diffraction	509
10.8 Principe des écrans complémentaires de Babinet	511
10.9 Diffraction par une ouverture circulaire ; remarques sur les petites ouvertures	514
10.10 Diffusion à la limite des petites longueurs d'onde	519
10.11 Théorème optique et sujets connexes	525
RÉFÉRENCES ET SUGGESTIONS DE LECTURE	530
PROBLÈMES	532
CHAPITRE 11 • LA THÉORIE DE LA RELATIVITÉ RESTREINTE	539
11.1 La situation avant 1900. Les deux postulats d'Einstein	540
11.2 Quelques expériences récentes	543
11.3 Transformations de Lorentz. Résultats fondamentaux de la cinématique relativiste	549
11.4 Addition des vitesses. Quadrivitesse	556
11.5 Énergie et impulsion relativistes d'une particule	558
11.6 Propriétés mathématiques de l'espace-temps de la relativité restreinte	565
11.7 Représentation matricielle des transformations de Lorentz. Générateurs infinitésimaux	569
11.8 La précession de Thomas	573
11.9 Invariance de la charge électrique ; covariance de l'électrodynamique	578
11.10 Transformation du champ électromagnétique	583
11.11 Équation de mouvement relativiste du spin dans des champs uniformes ou lentement variables	587
11.12 Remarque sur les notations et les unités en cinématique relativiste	591
RÉFÉRENCES ET SUGGESTIONS DE LECTURE	592
PROBLÈMES	594

CHAPITRE 12 • DYNAMIQUE DES PARTICULES RELATIVISTES ET DES CHAMPS ÉLECTROMAGNÉTIQUES	606
12.1 Lagrangien et hamiltonien d'une particule chargée relativiste placée dans un champ électromagnétique externe	607
12.2 Mouvement dans un champ magnétique statique et uniforme	613
12.3 Mouvement dans des champs électrique et magnétique statiques et uniformes	613
12.4 Dérive d'une particule dans un champ magnétique statique non uniforme	616
12.5 Invariance adiabatique du flux traversant l'orbite d'une particule	620
12.6 Corrections relativistes du lagrangien de particules chargées en interaction : lagrangien de Darwin	624
12.7 Le lagrangien du champ électromagnétique	626
12.8 Le lagrangien de Proca. Conséquences d'un photon massif	628
12.9 Masse effective du « photon » en supraconductivité. Profondeur de pénétration de London	631
12.10 Tenseur énergie-impulsion canonique ; tenseur énergie-impulsion symétrique ; lois de conservation	634
12.11 Forme covariante de la solution de l'équation d'onde. Fonctions de Green invariantes	640
RÉFÉRENCES ET SUGGESTIONS DE LECTURE	644
PROBLÈMES	646
CHAPITRE 13 • COLLISIONS, PERTES D'ÉNERGIE ET DIFFUSION DE PARTICULES CHARGÉES. RAYONNEMENT TCHERENKOV ET RAYONNEMENT DE TRANSITION	653
13.1 Transfert d'énergie lors d'une collision coulombienne entre une particule massive incidente et un électron libre stationnaire ; perte d'énergie lors de collisions dures	654
13.2 Pertes d'énergie lors de collisions douces ; perte totale d'énergie	657
13.3 Effet de densité et perte d'énergie par collision	661
13.4 Le rayonnement Tcherenkov	667
13.5 Diffusion élastique de particules par des atomes	671
13.6 Angle de diffusion quadratique moyen ; distribution angulaire de la diffusion multiple	673
13.7 Le rayonnement de transition	677
RÉFÉRENCES ET SUGGESTIONS DE LECTURE	685
PROBLÈMES	686
CHAPITRE 14 • RAYONNEMENT DE CHARGES EN MOUVEMENT	692
14.1 Potentiels de Liénard-Wiechert et champs d'une charge ponctuelle	693
14.2 Puissance totale rayonnée par une charge accélérée : la formule de Larmor et sa généralisation relativiste	696
14.3 Distribution angulaire du rayonnement émis par une charge accélérée	700
14.4 Rayonnement émis par une charge animée d'un mouvement ultra relativiste arbitraire	703

14.5	Spectre de fréquences et distribution angulaire de l'énergie rayonnée par des charges accélérées : résultats fondamentaux	705
14.6	Spectre de fréquences du rayonnement émis par une particule chargée relativiste en mouvement circulaire instantané	708
14.7	Ondulateurs et wigglers	715
RÉFÉRENCES ET SUGGESTIONS DE LECTURE		730
PROBLÈMES		731
CHAPITRE 15 • BREMSSTRAHLUNG, MÉTHODE DES QUANTA VIRTUELS, RAYONNEMENT ASSOCIÉ AUX PROCESSUS BÊTA		741
15.1	Rayonnement émis lors d'une collision	742
15.2	Bremsstrahlung lors de collisions coulombiennes	748
15.3	Effet d'écran ; pertes d'énergie radiative relativistes	755
15.4	La méthode des quanta virtuels	758
15.5	Bremsstrahlung et diffusion de quanta virtuels	763
15.6	Rayonnement associé à une désintégration bêta	765
15.7	Rayonnement associé à la capture électronique : disparition de la charge et du moment magnétique	767
RÉFÉRENCES ET SUGGESTIONS DE LECTURE		771
PROBLÈMES		772
CHAPITRE 16 • ATTÉNUATION DU RAYONNEMENT. MODÈLES CLASSIQUES DE PARTICULES CHARGÉES		780
16.1	Considérations liminaires	780
16.2	Conservation de l'énergie et force de réaction radiative	783
16.3	Détermination de la force de réaction radiative : théorie d'Abraham-Lorentz	786
16.4	Covariance relativiste, stabilité, pressions de Poincaré	791
16.5	Définitions covariantes de l'énergie et de l'impulsion électromagnétiques	792
16.6	Modèle covariant de particule chargée	795
16.7	Largeur de raie et déplacement des niveaux d'énergie d'un oscillateur	799
16.8	Diffusion et absorption de rayonnement par un oscillateur	802
RÉFÉRENCES ET SUGGESTIONS DE LECTURE		804
PROBLÈMES		805
ANNEXE A UNITÉS ET DIMENSIONS		810
A.1	Unités et dimensions ; unités fondamentales et unités dérivées	810
A.2	Unités et équations électromagnétiques	812

A.3	Systèmes d'unités électromagnétiques	814
A.4	Équations et unités dans les systèmes de Gauss et SI	816
ANNEXE B		820
B.1	Formules vectorielles	820
B.2	Théorèmes de calcul vectoriel	821
B.3	Localisation des informations clés sur les fonctions spéciales	821
B.4	Formes explicites des opérations vectorielles	822
BIBLIOGRAPHIE		823
INDEX		831