Bases de l'électromagnétisme dans les milieux matériels

André Moliton



537-20.1

Hermes Lavoisier

Table des matières

Avant-propos 17

Chapitre 1. Rappels : des lois physiques aux équations de base en électrostatique et magnétostatique du vide, cas des milieux conducteurs 19

1.1. Rappels d'analyse vectorielle 19
1.1.1. Les opérateurs 19
1.1.1.1. Le gradient 19
1.1.1.2. La divergence 20
1.1.1.3. Le rotationnel 20
1.1.1.4. Le laplacien (scalaire) 20
1.1.1.5. Le laplacien vectoriel 20
1.1.1.6. Remarque 20
1.1.2. Formules remarquables 22
1.1.3. Intégrales vectorielles 23
1.1.3.1. Circulation d'un vecteur $\vec{F}$ 23
1.1.3.2. Flux d'un vecteur $\vec{A}$ 24
1.1.3.3. Transformations d'intégrales 25
1.1.4. Terminologie 26
1.2. Electrostatique du vide 27
1.2.1. Loi de Coulomb 27
1.2.2. Champ électrique ; propriétés locale et intégrale 27
1.2.2.1. Forme du champ électrique 27
1.2.2.1. Propriétés locales et intégrales du champ électrique 28
1.2.3. Théorème de Gauss 28
1.2.3.1. Rappel : angle solide 28
1.2.3.2. Flux du champ électrique généré par une charge extérieure à une surface fermée donnée 30

1.2.3.3. Flux du champ électrique généré par une charge intérieure à une surface fermée donnée . . . 31
1.2.3.4. Généralisation : forme intégrale du théorème de Gauss . . . 31
1.2.3.5. Forme locale du théorème de Gauss . . . 32
1.2.4. Equation de Laplace et équation de Poisson . . . 33
1.2.4.1. Equation de Laplace . . . 33
1.2.4.2. Equation de Poisson . . . 34
1.3. Le vecteur densité de courant : milieux conducteurs et courant électrique . . . 35
1.3.1. Le vecteur $\vec{j}$: vecteur densité de courant . . . 35
1.3.1.1. Courant à travers une section . . . 35
1.3.1.2. Remarque . . . 35
1.3.1.3. Courant à travers une surface fermée . . . 36
1.3.2. Equation locale de conservation de la charge . . . 36
1.3.3. Cas des régimes stationnaires (permanents) . . . 37
1.3.3.1. Ligne et tube de courant . . . 37
1.3.3.2. Flux de $\vec{j}$ en régime stationnaire . . . 37
1.3.3.3. Propriétés de $\vec{j}$ en régime stationnaire . . . 38
1.3.3.4. Remarques . . . 39
1.3.4. La loi d'Ohm ; ses limites . . . 40
1.3.4.1. Le modèle (Drude) . . . 40
1.3.4.2. Détermination de la conductivité σ . . . 40
1.3.4.3. Ordre de grandeur . . . 41
1.3.4.4. Limites de validité de la loi d'Ohm . . . 42
1.3.4.5. Forme macroscopique de la loi d'Ohm . . . 43
1.3.5. Relaxation d'un conducteur . . . 43
1.3.6. Remarque : définition des courants surfaciques (nappe de courant) . . . 44
1.4. Magnétostatique . . . 45
1.4.1. Champ magnétique créé par un courant . . . 45
1.4.2. Potentiel vecteur . . . 46
1.4.3. Propriétés locale et intégrale de $\vec{B}$ . . . 47
1.4.4. Equation de Poisson du potentiel vecteur . . . 47
1.4.5. Propriétés du potentiel vecteur $\vec{A}$ . . . 48
1.4.5.1. En magnétostatique, on a $\mathrm{div}\vec{A} = 0$ . . . 48
1.4.5.2. Indétermination du potentiel vecteur . . . 49
1.4.6. Relation de Maxwell-Ampère . . . 49
1.4.6.1. Formes locale et intégrale du théorème d'Ampère . . . 49
1.4.6.2. Exemple simple d'utilisation du théorème d'Ampère . . . 50
1.4.6.3. Signification physique du rotationnel . . . 51
1.5. Exercices . . . 52
1.5.1. Exercice 1 . . . 52

1.2.3.3. Flux du champ électrique généré par une charge intérieure à une surface fermée donnée . . . 31
1.2.3.4. Généralisation : forme intégrale du théorème de Gauss . . . 31
1.2.3.5. Forme locale du théorème de Gauss. . . . 32
1.2.4. Equation de Laplace et équation de Poisson . . . 33
1.2.4.1. Equation de Laplace . . . 33
1.2.4.2. Equation de Poisson . . . 34
1.3. Le vecteur densité de courant : milieux conducteurs et courant électrique . . . 35
1.3.1. Le vecteur $\vec{j}$: vecteur densité de courant . . . 35
1.3.1.1. Courant à travers une section . . . 35
1.3.1.2. Remarque . . . 35
1.3.1.3. Courant à travers une surface fermée . . . 36
1.3.2. Equation locale de conservation de la charge . . . 36
1.3.3. Cas des régimes stationnaires (permanents) . . . 37
1.3.3.1. Ligne et tube de courant . . . 37
1.3.3.2. Flux de $\vec{j}$ en régime stationnaire . . . 37
1.3.3.3. Propriétés de $\vec{j}$ en régime stationnaire . . . 38
1.3.3.4. Remarques . . . 39
1.3.4. La loi d'Ohm ; ses limites . . . 40
1.3.4.1. Le modèle (Drude) . . . 40
1.3.4.2. Détermination de la conductivité σ . . . 40
1.3.4.3. Ordre de grandeur . . . 41
1.3.4.4. Limites de validité de la loi d'Ohm . . . 42
1.3.4.5. Forme macroscopique de la loi d'Ohm . . . 43
1.3.5. Relaxation d'un conducteur . . . 43
1.3.6. Remarque : définition des courants surfaciques (nappe de courant) . . . 44
1.4. Magnétostatique . . . 45
1.4.1. Champ magnétique créé par un courant . . . 45
1.4.2. Potentiel vecteur . . . 46
1.4.3. Propriétés locale et intégrale de $\vec{B}$ . . . 47
1.4.4. Equation de Poisson du potentiel vecteur . . . 47
1.4.5. Propriétés du potentiel vecteur $\vec{A}$ . . . 48
1.4.5.1. En magnétostatique, on a $\mathrm{div}\,\vec{A} = 0$ . . . 48
1.4.5.2. Indétermination du potentiel vecteur . . . 49
1.4.6. Relation de Maxwell-Ampère . . . 49
1.4.6.1. Formes locale et intégrale du théorème d'Ampère . . . 49
1.4.6.2. Exemple simple d'utilisation du théorème d'Ampère . . . 50
1.4.6.3. Signification physique du rotationnel . . . 51
1.5. Exercices . . . 52
1.5.1. Exercice 1 . . . 52

1.5.2. Exercice 2 : champ et potentiel générés à l'intérieur et à l'extérieur d'une sphère chargée 54

Chapitre 2. Electrostatique des milieux diélectriques 61

2.1. Généralités : polarisation d'un diélectrique 61
2.1.1. Définition d'un diélectrique et nature des charges. 61
2.1.2. Propriétés caractéristiques des dipôles. 62
2.1.2.1. Potentiel électrique produit par un dipôle électrique 62
2.1.2.2. Energie d'un dipôle électrique placé dans un champ $\vec{E}$ uniforme 63
2.1.2.3. Couple électrique (figure 2.2b). 64
2.1.3. Diélectrique dans un condensateur. 64
2.1.3.1. Cas du condensateur avec le vide entre ses armatures (figure 2.3). 64
2.1.3.2. Existence d'un champ dépolarisant dans un diélectrique . . 64
2.1.4. Le vecteur polarisation $\vec{P}$ 66
2.2. Charges équivalentes à la polarisation 67
2.2.1. Calcul des charges équivalentes à la polarisation 67
2.2.1.1. Potentiel généré par un volume fini de diélectrique polarisé en un point P 67
2.2.1.2. Charges équivalentes à la polarisation 68
2.2.2. Mise en évidence physique 69
2.2.2.1. Remarques préliminaires : déplacement des charges et polarisation correspondante 69
2.2.2.2. Conséquence : quantité de charges sortantes et rentrantes dans le volume du diélectrique suite à sa polarisation. Densité des charges volumiques équivalentes à la polarisation. 70
2.2.2.3. Cas des charges surfaciques 71
2.2.2.4. Conclusion. 72
2.2.3. Remarque importante. 73
2.3. Vecteurs champ électrique $\vec{E}$ et déplacement électrique $\vec{D}$. Propriétés aux interfaces. 74
2.3.1. Vecteurs champ électrique $\vec{E}$ et déplacement électrique $\vec{D}$; potentiel électrique 75
2.3.1.1. Loi de Coulomb dans un diélectrique. 75
2.3.1.2. Champ électrique. 75
2.3.1.3. Potentiel électrique. 75
2.3.1.4. Vecteur déplacement électrique 76
2.3.2. Théorème de Gauss. 76
2.3.3. Conditions de passage pour $\vec{E}$ et $\vec{D}$ entre deux milieux diélectriques. 77
2.3.3.1. Continuité du potentiel 77
2.3.3.2. Continuité de la composante tangentielle de $\vec{E}$ 77

2.3.3.3. Continuité de la composante normale de $\vec{D}$ 78
2.3.4. Réfraction des lignes de champ ou d'induction 79
2.4. Relations entre le vecteur déplacement et le vecteur polarisation 80
2.4.1. Théorème de Coulomb 80
2.4.2. Représentations du système diélectrique-armature. Relation $\vec{P} = (\varepsilon - \varepsilon_0)\vec{E}_a$ 81
2.4.3. Diélectriques lhi. Relation $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}_a + \vec{P}$ 82
2.4.3.1. Diélectrique lhi 82
2.4.3.2. Relation $\vec{D} = \varepsilon_0 \vec{E}_a + \vec{P}$ 83
2.4.4. Remarques 83
2.4.5. Diélectriques linéaires, non homogènes et non isotropes. 84
2.4.6. Exercices de cours 85
2.4.6.1. Sphère diélectrique 85
2.4.6.2. Cavité sphérique vide 86
2.5. Mécanisme de la polarisation des diélectriques : réponse à un champ électrique statique 88
2.5.1. Polarisation induite et d'orientation 88
2.5.1.1. Polarisation induite 88
2.5.1.2. Polarisation d'orientation 90
2.5.1.3. Conclusion 90
2.5.2. Etude la polarisation induite d'une molécule 90
2.5.3. Etude de la polarisation par orientation 92
2.5.3.1. Le principe et le résultat 92
2.5.3.2. Fonction de Langevin 92
2.5.3.3. Polarisation molaire 96
2.5.3.4. Application : détermination des moments permanents et de la polarisabilité α_m 96
2.6. Exercices du chapitre 2 97
2.6.1. Exercice 1. Champ électrique dans une petite cavité cubique ménagée dans un diélectrique. 97
2.6.2. Exercice 2 : Polarisation d'une lame diélectrique 101
2.6.3. Exercice 3 : charge en regard d'un plan diélectrique (images électriques). 103
2.6.4. Exercice 4 : polarisabilité atomique selon le modèle de J.J. Thomson 108
2.6.5. Exercice 5 : champ dans une cavité sphérique de dimension moléculaire 110

Chapitre 3. Propriétés magnétiques de la matière 119
3.1. Moment magnétique 119

3.1.1. Remarque préliminaire : le champ magnétique ne peut pas dériver d'un potentiel scalaire uniforme 119
3.1.2. Potentiel vecteur et champ magnétique produits à grande distance par un circuit fermé. 119
3.1.2.1. Forme du potentiel vecteur 119
3.1.2.2. Approximation r >> dimension de (C) ; moment magnétique 121
3.1.3. Analogie moment magnétique – moment (dipolaire) électrique ; justification de la dénomination, pour $\vec{M} = I \iint_S \vec{dS}$, de doublet magnétique. 124
3.1.4. Propriétés des moments magnétiques $\vec{M} = i \iint_S \vec{dS}$ 125
3.1.4.1. Les moments magnétiques sont positifs lorsque le sens de rotation du courant correspond à une face nord 125
3.1.4.2. Energie d'un dipôle magnétique placé dans un champ magnétique 126
3.1.4.3. Force et couple agissant sur $\vec{M}$ placé dans $\vec{B}$ 127
3.1.5. Moments magnétiques dans la matière 128
3.1.5.1. Rappels élémentaires de mécanique. 128
3.1.5.2. Moment magnétique atomique. 128
3.1.6. Précessions du moment magnétique 129
3.1.6.1. Action d'un champ magnétique : effet gyroscopique et précession de Larmor. 129
3.1.6.2. Précession dans le cas du couplage $\vec{L}, \vec{S}$: précession interne 130
3.2. Champ magnétique dans les milieux matériels 132
3.2.1. Intensité d'aimantation. 132
3.2.2. Potentiel vecteur produit par un morceau de matière magnétique (aimantée et caractérisée par $\vec{I}$) ; courants ampériens 132
3.2.3. Représentation physique des courants ampériens équivalents à l'aimantation de la matière 135
3.2.3.1. Cas d'un matériau aimanté uniformément et perpendiculairement au plan de figure : $\vec{I} = I_z$ 136
3.2.3.2. Cas d'une aimantation non uniforme ($\vec{I}$ dirigée selon Oz et telle que $\partial I / \partial y > 0$) 137
3.2.4. Définition des vecteurs $\vec{B}$ et $\vec{H}$ dans la matière. 138
3.2.4.1. Définition de $\vec{B}$ 138
3.2.4.2. Définition du vecteur excitation $\vec{H}$ 138
3.2.5. Conditions de passage entre deux milieux magnétiques 139
3.2.5.1. Continuité de la composante normale de $\vec{B}$ 139

3.2.5.2. Relation entre les composantes tangentielles du vecteur $\vec{H}$ à la traversée d'une nappe de courant parcourue par un courant superficiel $\vec{j}_s$ 140
3.2.6. Milieux magnétiques lhi (linéaires, homogènes, isotropes) 142
3.2.6.1. Définition 142
3.2.6.2. Conséquence 1 142
3.2.6.3. Conséquence 2 142
3.2.7. Remarque : analogie milieux diélectriques-milieux magnétiques. Appellations pour $\vec{H}$ et $\vec{B}$. Masses magnétiques définies comme équivalent de calcul. 143
3.2.7.1. Analogie (plutôt ancienne) basée sur les équations 143
3.2.7.2. Analogie basée sur les équations « sources » des champs (théorème de Gauss et théorème d'Ampère). 143
3.2.7.3. Conclusion. 143
3.2.7.4. Remarque : masses magnétiques, intermédiaires de calcul pour les aimants permanents 144
3.3. Exercices du chapitre 3 145
3.3.1. Exercice 1. Moment magnétique associé à une sphère chargée superficiellement et tournant autour de son axe 145
3.3.2. Exercice 2. Champ magnétique dans une cavité plongée dans un milieu aimanté 146
3.3.3. Exercice 3. Cylindre parcouru par des courants superficiels. . . . 149
3.3.4. Exercice 4. Courant image. 151

Chapitre 4. Les matériaux diélectriques et magnétiques 157

4.1. Les diélectriques 157
4.1.1. Définition. 157
4.1.2. Types et origines des claquages 158
4.1.2.1. Claquage thermique 158
4.1.2.2. Claquage intrinsèque. 158
4.1.2.3. Evolution de Ec dans le temps ; le problème du vieillissement 158
4.1.3. Les différents types d'isolants 159
4.1.3.1. Isolants naturels et inorganiques 159
4.1.3.2. Isolants organiques de synthèse 160
4.1.4. Les électrets 161
4.1.4.1. Définition et propriétés 161
4.1.4.2. Principe des voltmètres électrostatiques (appareils servant à mesurer les densités de charge) 162
4.1.4.3. Les piézoélectrets. 163
4.1.5. Les ferroélectriques. 164
4.1.5.1. Définition 164

4.1.5.2. Propriétés générales 164
4.1.5.3. Etude de la polarisation en fonction de la température 166
4.2. Les magnétiques 169
4.2.1. Introduction 169
4.2.1.1. Champ dans un barreau (de perméabilité μ) placé dans un champ magnétique $\vec{H}_0$ 169
4.2.1.2. Propriétés générales 170
4.2.2. Le diamagnétisme : théorie de Langevin 171
4.2.3. Le paramagnétisme 173
4.2.3.1. Théorie de Langevin 173
4.2.3.2. Correction apportée par la théorie quantique 176
4.2.3.3. Paramagnétisme à champ moléculaire (théorie de Curie-Weiss). 176
4.2.3.4. Remarques 177
4.2.4. Le ferromagnétisme 179
4.2.4.1. Orientation d'un barreau ferromagnétique (χ_m intense) dans un champ magnétique 179
4.2.4.2. Courbes d'aimantation des ferromagnétiques 181
4.2.4.3. Ferromagnétiques doux et ferromagnétiques durs 188
4.2.4.4. Notions sur la théorie du ferromagnétisme 189
4.2.5. L'antiferromagnétisme et le ferrimagnétisme 194
4.2.5.1. L'antiferromagnétisme 194
4.2.5.2. Le ferrimagnétisme 194
4.3. Exercice : diélectrique, électret, aimant, entre des armatures sphériques 195

Chapitre 5. Etude des régimes variables. Les équations de Maxwell 203

5.1. Régimes lentement variables : l'approximation du régime des états quasi stationnaires (AREQS) 203
5.1.1. Définition. 203
5.1.2. Propagation 204
5.1.3. Induction électromagnétique : rappels 204
5.1.4. Circuit électrique en régime lentement variable 205
5.1.4.1. Cas d'un conducteur (sans coupure : pas de capacité) 205
5.1.4.2. Cas d'un conducteur avec coupure : effet de capacité 205
5.1.4.3. Conclusion : caractéristique électrique d'un circuit en régime lentement variable. 205
5.1.5. Relation de Maxwell-Faraday 206
5.1.5.1. Loi de Lenz 206
5.1.5.2. Forme du champ électrique résultant 206
5.1.5.3. Relation de Maxwell-Faraday 207
5.1.5.4. Remarque : équation de Poisson 207

5.2. Régimes rapidement variables (div $\vec{j} \neq 0$) ; relation de Maxwell-Ampère 207
5.2.1. Insuffisance de $\overrightarrow{\text{rot}}\,\vec{H} = \vec{j}_\ell$ (première forme du théorème d'Ampère, établi dans le cas des régimes stationnaires) 207
5.2.2. Relation de Maxwell-Ampère 208
5.2.2.1. Relation faisant intervenir les vecteurs $\vec{H}$ et $\vec{D}$ 208
5.2.2.2. Relation faisant intervenir les vecteurs $\vec{B}$ et $\vec{E}$ 209
5.2.3. Interprétation physique de l'origine des courants de déplacement 211
5.2.3.1. Rappel : expression du champ électrique dans un condensateur en fonction des densités superficielles de charges portées par les armatures 211
5.2.3.2. Densité de courant dans une capacité 212
5.2.3.3. Remarque : autres façons d'obtenir l'expression du courant de déplacement 213
5.2.4. Conclusion 214
5.3. Les équations de Maxwell 215
5.3.1. Formes de div $\vec{E}$ et de div $\vec{B}$ en régime variable. 215
5.3.1.1. Relation de Gauss – Maxwell 215
5.3.1.2. Expression de div $\vec{B}$ 216
5.3.2. Récapitulatif des équations de Maxwell. 216
5.3.3. Equations de Maxwell et conditions aux limites entre deux milieux 217
5.3.3.1. Continuité de D_n avec $\sigma_\ell = 0$ 217
5.3.3.2. Continuité de B_n 217
5.3.3.3. Continuité de E_t 217
5.3.3.4. Continuité de H_t avec $j_\ell = 0$ 218
5.4. Exercice. Comparaison des valeurs des courants de conduction et de déplacement pour différents milieux. 219

Chapitre 6. Propriétés générales des ondes électromagnétiques. Propagation dans le vide 223

6.1. Introduction : rappel des équations de la propagation dans le vide ($\rho_\ell = 0$ et $j_\ell = 0$). 223
6.1.1. Les équations de Maxwell dans le vide, dans le cas où $\rho_\ell = 0$ et $j_\ell = 0$. 223
6.1.2. Equations de propagation 223
6.1.3. Solutions de l'équation de propagation pour des ondes telles que $\vec{E}$ et $\vec{B}$ ne dépendent que d'une coordonnée spatiale z, et du temps t. 224
6.1.3.1. Forme des solutions 224
6.1.3.2. Signification physique des solutions G(t – z/c) et F(t + z/c). 225
6.2. Les différents types d'onde 226

6.2.1. Ondes transverses et ondes longitudinales 226
6.2.1.1. Signal transverse 226
6.2.1.2. Signal longitudinal 227
6.2.2. Ondes planes 227
6.2.2.1. Définition 227
6.2.2.2. Conséquence : onde électromagnétique plane 227
6.2.2.3. Réalisation pratique d'ondes planes 228
6.2.3. Ondes sphériques 228
6.2.4. Ondes progressives 229
6.2.4.1. Ondes planes progressives (OPP) 229
6.2.4.2. Ondes planes progressives monochromatiques (OPPM) . . . 229
6.2.5. Ondes stationnaires 231
6.3. Propriétés générales des ondes électromagnétiques planes progressives (OEMPP) dans le vide (avec $\rho_f = 0$ et $j_f = 0$) 232
6.3.1. $\vec{E}$ et $\vec{B}$ sont perpendiculaires à la direction de propagation : onde TEM 233
6.3.2. Relation entre $\vec{E}$ et $\vec{B}$ 233
6.3.3. Décomposition d'une onde EM plane progressive en la superposition de deux ondes EM planes progressives polarisées rectilignement (OEMPPR) 236
6.3.3.1. Définition préliminaire : onde polarisée rectilignement . . . 236
6.3.3.2. Décomposition de $\vec{E}$ et $\vec{B}$ 236
6.3.4. Représentation et décomposition spectrale des ondes OEMPPR . 237
6.3.4.1. Représentation spatiale 237
6.3.4.2. Représentation en fonction du temps 238
6.3.4.3. Décomposition spectrale 238
6.4. Propriétés des ondes électromagnétiques planes progressives monochromatiques (OEMPPM) 239
6.4.1. Etude de la polarisation 239
6.4.1.1. Cas où $\varphi = 0$ (ondes 1 et 2 en phase) 240
6.4.1.2. Cas où $\varphi = \pi$ (ondes 1 et 2 en opposition de phase) 240
6.4.1.3. Cas où $\varphi = \pi/2$ (ondes 1 et 2 en quadrature) : polarisation circulaire ou elliptique droite (ellipse droite) 240
6.4.1.4. Cas où φ est quelconque 242
6.4.2. Expression mathématique d'une onde plane monochromatique se propageant dans une direction quelconque OH 244
6.4.2.1. Cas de l'onde polarisée rectilignement 244
6.4.2.2. Cas d'une onde de polarisation quelconque 247
6.4.3. Vitesse de propagation des ondes ; périodicité spatiale 248
6.5. Représentation de Jones 249
6.5.1. Expression complexe d'une onde plane monochromatique se propageant dans une direction Oz 249
6.5.2. Représentation à l'aide de la matrice de Jones 251

6.6. Exercices 254
6.6.1. Exercice 1. Décomposition en notation réelle d'une onde rectiligne en deux ondes circulaires de sens inverse 254
6.6.2. Exercice 2. Cas particulier des milieux anisotropes ; exemple des lames à retard de phase 255
6.6.3. Exercice 3. Représentation matricielle (de Jones) de la polarisation 258

Chapitre 7. Ondes EM dans les milieux illimités dispersifs et absorbants Vecteur de Poynting 261

7.1. Propagation des ondes EM dans un milieu illimité non chargé ($\rho_\ell = 0, j_\ell = 0$). Relation de dispersion des ondes EM 261
7.1.1. Rappel : équations de Maxwell pour un milieu matériel avec $\rho_\ell = 0, j_\ell = 0$ 261
7.1.2. Equations générales de propagation 261
7.1.3. Cas où l'onde EM est monochromatique et le milieu lhi 262
7.1.4. Etude du cas des ondes planes progressives monochromatiques (OEMPPM) 264
7.1.4.1. Structure de l'onde EM plane progressive monochromatique (OEMPPM) 265
7.1.4.2. Relation de dispersion 266
7.2. Etude de différents types de milieux 267
7.2.1. Milieux non absorbants : cas successifs d'un milieu non dispersif, dispersif normal puis dispersif anormal – Indice 267
7.2.1.1. Cas du vide 268
7.2.1.2. Cas d'un milieu non dispersif 268
7.2.1.3. Milieu dispersif normal 268
7.2.1.4. Milieu dispersif anormal 269
7.2.1.5. Indice 269
7.2.1.6. Remarque 270
7.2.2. Milieux absorbants ; indice complexe 270
7.2.2.1. Milieux absorbants (permittivité diélectrique et vecteur d'onde complexes) 270
7.2.2.2. Indice complexe 272
7.3. Energie électromagnétique d'une onde plane. Vecteur de Poynting . . 273
7.3.1. Définition dans le cas d'un milieu de permittivité absolue ε, de perméabilité magnétique μ et soumis à un courant de conduction j_ℓ ; signification physique 273
7.3.1.1. Définition 273
7.3.1.2. Signification physique 274
7.3.2. Vitesse de propagation de l'énergie dans le vide 275
7.3.3. Notation complexe 277

7.3.4. Vecteur de Poynting et puissance moyenne pour une OEMPPM dans un milieu non absorbant (k et n réels) et non magnétique ($\mu_r = 1$, soit $\mu = \mu_0$) 278
7.3.5. Vecteur de Poynting pour un OEMPPM dans un milieu diélectrique absorbant et tel que μ soit réel 279
7.4. Exercice : vecteur de Poynting (variante à la présentation du cours) . . 280

Chapitre 8. Ondes dans les milieux matériels illimités : milieux diélectriques, plasmas, métalliques et magnétiques 289
8.1. Nature des interactions des ondes EM avec les milieux matériels 289
8.1.1. Position du problème 289
8.1.2. Les types de force intervenant dans les milieux classiquement étudiés 290
8.1.2.1. Milieu diélectrique 290
8.1.2.2. Milieu plasma 291
8.1.2.3. Milieu métallique 291
8.2. Interaction des OEM avec un milieu diélectrique lhi : étude de la polarisation électronique ; dispersion et absorption à la résonance 291
8.2.1. Représentation d'un diélectrique dans le modèle du gaz d'électrons (modèle de Drude Lorentz). Etude du mouvement électronique 294
8.2.1.1. Le modèle de Drude-Lorentz 294
8.2.1.2. L'équation du mouvement des électrons de charge $-e$ 294
8.2.2. Forme de la polarisation, de la susceptibilité et de la permittivité diélectrique 295
8.2.2.1. Expression de la polarisation électronique 295
8.2.2.2. Expression de la susceptibilité et de la permittivité diélectrique (composante électronique) 295
8.2.2.3. Cas limites 297
8.2.2.4. Remarque : correction de Lorentz 298
8.2.3. Etude des courbes $\chi_e'(\omega)$ et $\chi_e''(\omega)$ pour $\omega \approx \omega_0$ (au voisinage d'une zone d'absorption) 298
8.2.3.1. Expression de χ_e^* 299
8.2.3.2. Expression de χ_e'' 299
8.2.3.3. Evolution de $\chi_e'(\omega)$ et $\chi_e''(\omega)$ pour $\omega \approx \omega_0$ 300
8.2.4. Etude des courbes $\chi_e'(\omega)$ et $\chi_e''(\omega)$ pour $\omega \neq \omega_0$ (loin d'une zone d'absorption) 302
8.2.4.1. Forme de $\chi_e'(\omega)$ 302
8.2.4.2. Forme de $\chi_e''(\omega)$ 303
8.2.4.3. Représentation graphique 303
8.2.5. Pôle de la fonction diélectrique. Onde électrique longitudinale . . 304

8.2.6. Comportement d'une OEM plane, progressive transverse, sinusoïdale, de pulsation comprise entre ω_0 et ω_ℓ (mais suffisamment éloignée de ω_0 pour que $\varepsilon'' \approx 0$) 306
8.2.7. Etude de l'OEMPPM en dehors de la zone d'absorption ($\omega \neq \omega_0$) et de l'intervalle $[\omega_0, \omega_\ell]$ 307
8.2.7.1. Equation reliant ω et k 307
8.2.7.2. Relation $\omega = f(k)$ 308
8.2.7.3. Forme de la courbe de dispersion 308
8.2.8. Relation de dispersion $n = f(\lambda_0)$ pour $\omega << \omega_0$ 309
8.2.8.1. Relation de Maxwell dans le visible. 309
8.2.8.2. Relation de dispersion pour $\omega < \omega_{0e}$: formule de Cauchy . 310
8.2.8.3. Relation de Rayleigh : relation entre vitesse de groupe et vitesse de phase 311
8.2.8.4. Remarque : dispersion normale et anormale 312
8.3. Propagation d'une OEMPPM dans un plasma ($\Leftrightarrow$ réponse diélectrique d'un gaz électronique) 312
8.3.1. Oscillations de plasma ; pulsation plasma 312
8.3.1.1. Définition d'un plasma 312
8.3.1.2. Etude du déplacement des électrons d'un plasma sous l'effet d'une perturbation mécanique 313
8.3.2. Réponse diélectrique d'un gaz électronique 316
8.4. Propagation d'une OEM dans un milieu matériel de type métallique (présence d'une force de frottement) 321
8.5. Cas des milieux magnétiques non chargés. 326
8.5.1. Equation de dispersion dans les milieux magnétiques conducteurs 326
8.5.2. Impédance caractéristique (cas où k est réel). 328
8.6. Exercices 329
8.6.1. Exercice 1 : Mise en évidence des formes complexes de la polarisation et de la permittivité diélectrique 329
8.6.2. Exercice 2. Etude des propriétés électriques d'un métal en partant de la loi de déplacement x des électrons d'un métal, et de la forme de la polarisation électronique induite (variante de la section 8.4) 335

Index 341

Avant-propos

Ce livre correspond à l'enseignement (cours et exercices avec solutions détaillées) de base en électromagnétisme effectué durant de nombreuses années au niveau de la licence, c'est à dire de la troisième année de la nouvelle licence du schéma LMD. Typiquement, il correspond à un crédit (ECTS) de soixante heures d'enseignement, qui couvre les quatre types de licences suivantes : licence de physique, licence ès sciences physiques (licence d'enseignement), licence de physique et applications, licence EEA.

Tout au long de ce livre, nous avons fait le choix de présenter dans le détail les démonstrations (données parfois sous forme d'exercices), qui rassurent l'étudiant sur le bien fondé des résultats ; surtout, nous avons essayé de démystifier au mieux l'origine physique de certaines grandeurs (trop longtemps considérées comme fictives ou comme des équivalents de calculs) : charges de polarisation, courants ampériens (« équivalents » à l'aimantation), courants de déplacement...

De façon concrète, le livre débute par un chapitre de rappels d'électromagnétisme dans le vide, pour permettre une remise à un même niveau des étudiants en début d'année. Le formalisme des opérateurs de l'analyse vectorielle est immédiatement introduit, puis utilisé pour bien familiariser tous les étudiants à cet outil.

L'électrostatique et la magnétostatique sont ensuite décrits, avec l'établissement des théorèmes de base dans la matière : théorème de Gauss et théorème d'Ampère permettant de calculer, en principe de façon simple, le champ électrique et le champ magnétique dans la matière. Les calculs des charges équivalentes à la polarisation ainsi que ceux des courants ampériens équivalents à l'aimantation sont détaillés, et on insiste donc sur l'origine physique de ces charges et de ces courants reliés respectivement au vecteur polarisation et au vecteur intensité d'aimantation.

Un chapitre entier est dédié à la description des milieux diélectriques et magnétiques : isolants, électrets et piézoélectrets, ferroélectriques, diamagnétiques, paramagnétiques, ferromagnétiques, antiferromagnétiques, ferrimagnétiques.

L'étude des régimes variables est ensuite abordée, en distinguant comme de coutume les régimes lentement variables (approximation des états quasi stationnaires) et les régimes rapidement variables. L'origine physique des courants de déplacement est détaillée, et les équations de Maxwell dans la matière sont établies. Bien que souvent traitées au cours des deux premières années, les propriétés générales des ondes électromagnétiques sont présentées à partir de l'étude de leur propagation dans le vide. On insiste sur le problème des deux notations utilisées pour représenter les ondes (par les diélectriciens et les opticiens), notations qui correspondent en fait strictement à la description de la même onde.

Les propriétés des ondes dans les milieux matériels de dimensions illimitées sont ensuite décrites ; on présente la méthode générale permettant de déterminer la polarisation dynamique dans un matériau dispersif et absorbant, et le vecteur de Poynting est défini avec son application à la détermination de l'énergie d'une onde électromagnétique. Enfin, on étudie le comportement des ondes dans les différents milieux habituels : diélectrique, plasma, métal, milieu magnétique non chargé.

Les applications de cette thématique sont développées dans un deuxième tome : *Applications de l'électromagnétisme dans les milieux matériels*. Le comportement des milieux diélectriques dans le spectre électromagnétiques est présenté de façon détaillée, ce qui constitue une introduction fondamentale à la spectroscopie des solides. Les milieux de dimensions finies y sont présentés avec les systèmes auxquels ils ont donné naissance (émetteurs et récepteurs électromagnétiques, guides d'ondes électromagnétiques, composants…).

Enfin, un troisième tome : *Processus fondamentaux en électromagnétisme*, rassemble la description de processus fondamentaux en présence du champ électromagnétique. L'étude des sources et des interactions du champ électromagnétique est d'abord menée. Les effets aux limites (petites dimensions : cavités – champs intenses induisant des effets non linéaires) sont ensuite abordés. Un chapitre est finalement consacré à l'étude du déplacement des charges dans les champs électromagnétiques, avec une introduction à l'optique ionique (ou électronique) ; une illustration de l'importance des processus électromagnétiques est donnée lors de l'étude détaillée d'un grand appareil : accélérateur d'ions faisant usage d'une source ECR.