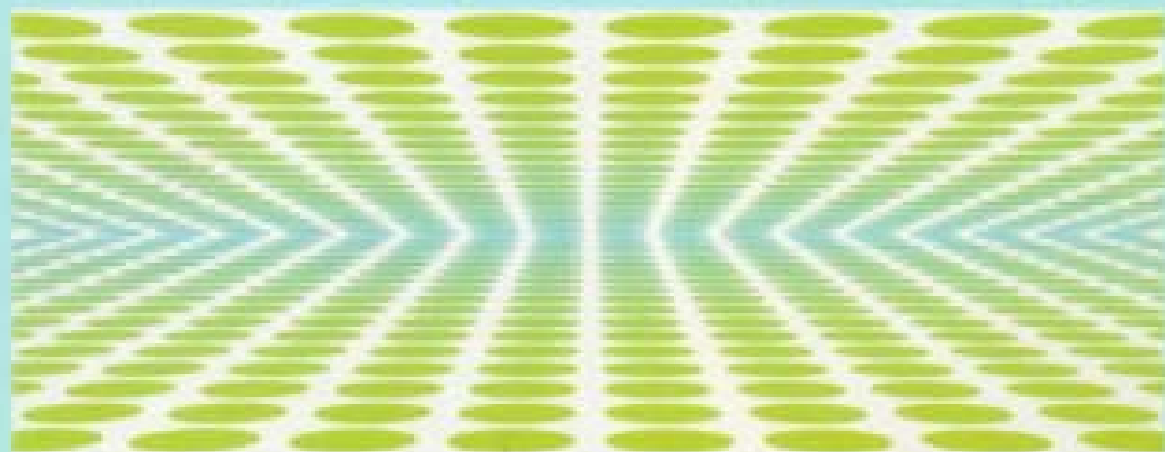


Bases de l'électromagnétisme dans les milieux matériels

André Moliton



Hermès

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. Relaxeation d'un conducteur	43
1.3.6. Remarque : définition des courants surfaciques (cage 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 $\text{divp } \vec{A} = 0$	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 $\vec{P} = (\epsilon - \epsilon_0)\vec{E}_a$	81
2.4.3. Diélectriques lhi. Relation $\vec{D} = \epsilon_0\vec{E}_a + \vec{P}$	82
2.4.3.1. Diélectrique lhi	82
2.4.3.2. Relation $\vec{D} = \epsilon_0\vec{E}_a + \vec{P}$	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 $r \gg$ dimension de (C) ; moment magnétique	121
3.1.3. Analogie moment magnétique – moment (dipolaire) électrique ; justification de la dénomination, pour $\vec{M} = I \oint_S \vec{dS}$, de doublet magnétique.	124
3.1.4. Propriétés des moments magnétiques $\vec{M} = i \oint_S \vec{dS}$	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 Ih (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 E_c 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 ($\text{div } \vec{J} \neq 0$) ; relation de Maxwell-Ampère	207
5.2.1. Insuffisance de $\vec{\text{rot}} \vec{H} = \vec{J}$ (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 $\text{div } \vec{E}$ et de $\text{div } \vec{B}$ en régime variable	215
5.3.1.1. Relation de Gauss - Maxwell	215
5.3.1.2. Expression de $\text{div } \vec{B}$	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 $\sigma_f = 0$	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 $j_f = 0$	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 ($\rho_f = 0$ et $j_f = 0$)	223
6.1.1. Les équations de Maxwell dans le vide, dans le cas où $\rho_f = 0$ et $j_f = 0$	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 $\rho_l = 0$ et $j_l = 0$)	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 ($\rho_f = 0, j_f = 0$). Relation de dispersion des ondes EM	261
7.1.1. Rappel : équations de Maxwell pour un milieu matériel avec $\rho_f = 0, j_f = 0$	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_f ; 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_f (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 $[\omega_0, \omega_f]$	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 $\omega \ll \omega_0$	309
8.2.8.1. Relation de Maxwell dans le visible	309
8.2.8.2. Relation de dispersion pour $\omega < \omega_{De}$: 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