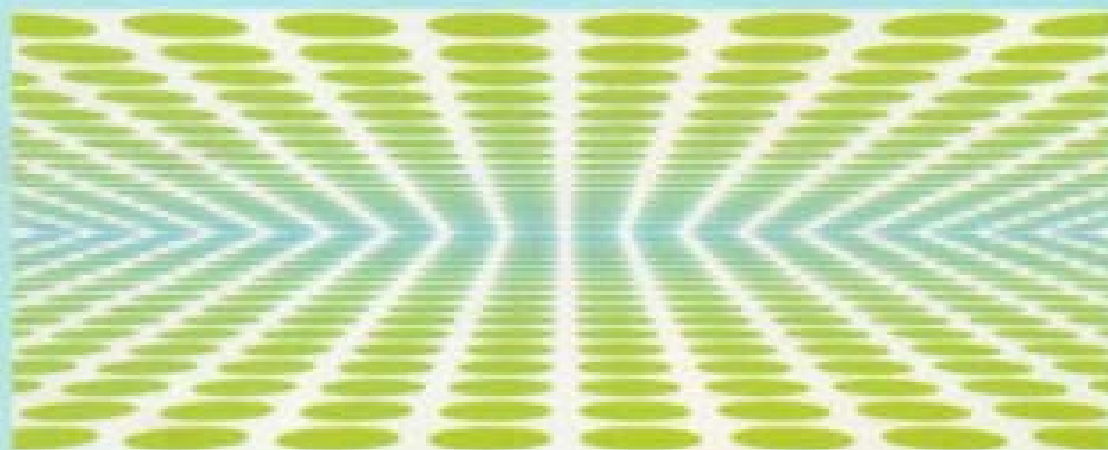


Applications de l'électromagnétisme dans les milieux matériels

André Moliton



Hermès

Lavoisier

Table des matières

Avant-propos	15
 Chapitre 1. Diélectriques en régime variable : étude phénoménologique de la relaxation diélectrique	 17
1.1. Définitions des permittivités diélectriques et de la conductivité diélectrique ; classification des différents phénomènes diélectriques	17
1.1.1. Permittivité absolue	17
1.1.2. Permittivité relative	18
1.1.3. Permittivité relative complexe	18
1.1.4. Permittivités limites	20
1.1.5. Conductivité diélectrique	20
1.1.6. Classification des divers phénomènes diélectriques	20
1.2. Etude classique de l'absorption dipolaire Debye (ADD)	23
1.2.1. Forme de la polarisation en régime continu (statique)	23
1.2.2. Etude de la polarisation dipolaire en fonction du temps	24
1.2.3. Equations de Debye ; diagramme d'Argand	25
1.2.3.1. Formules de Debye	25
1.2.3.2. Diagramme d'Argand (représentation de Cole et Cole)	26
1.2.4. Représentations pratiques	28
1.2.4.1. Le demi-cercle aplati de Cole et Cole (figure 1.5)	28
1.2.4.2. L'arc oblique de Cole-Davidson	29
1.3. Le modèle du double puit de potentiel ; représentations physiques	29
1.3.1. Introduction	29
1.3.2. Polarisation associée au déplacement d'électrons entre deux positions séparées par une barrière de potentiel	31
1.3.2.1. Niveaux pièges et phosphorescence	31

1.3.2.2. Transposition au cas d'un diélectrique possédant des niveaux pièges. Effet d'un champ électrique sur les transitions entre niveaux pièges	32
1.3.2.3. Expression de la polarisation à un instant t qui fait suite à un déplacement d'électrons	35
1.3.3. Cas de la rotation d'un dipôle sous l'effet d'un champ électrique	36
1.3.3.1. Utilisation de l'équivalence « rotation de dipôle = déplacement de charges »	37
1.3.3.2. En reprenant le calcul direct	37
1.3.4. Détermination pratique de la profondeur des puits de potentiel	38
1.3.4.1. Formules de base	38
1.3.4.2. Détermination pratique	40
1.4. Exercices	40
1.4.1. Exercice 1 : le double puits de potentiel à l'état d'équilibre	40
1.4.2. Exercice 2 : diagramme de Cole-Cole	45
1.4.3. Exercice 3 : diagramme de Cole-Davidson	50
1.4.4. Exercice 4 : relations linéaires basées sur les équations de Debye ; relations de Cole-Brot	53

Chapitre 2. Analyses et mesures diélectriques 59

2.1. Introduction : représentation d'un diélectrique par un circuit équivalent	59
2.2. Etude de différents circuits équivalents susceptibles de représenter un diélectrique réel présentant un phénomène de relaxation ; représentations $\epsilon' = f(\omega)$ et $\epsilon'' = g(\omega)$	60
2.2.1. Cas du circuit parallèle	60
2.2.2. Cas du circuit série	62
2.2.3. Association des circuits parallèle et série ; courbes de relaxation	63
2.3. Etude du circuit résonant	66
2.4. Représentation d'un diélectrique hétérogène (poudres) par le modèle en couches : deux circuits R-C parallèles en série. Effet Maxwell-Wagner-Sillars	67
2.5. Spectroscopie d'impédance	70
2.5.1. Exemple du circuit parallèle	70
2.5.2. Représentation condensée	72
2.6. Mesures diélectriques : description sommaire des appareils de mesure selon le domaine de fréquence d'étude	73

2.6.1. Remarque préliminaire : expressions du facteur de qualité et de la tangente de perte pour les différents circuits équivalents à une capacité ou à une bobine	73
2.6.1.1. Condensateur dans la représentation série (circuit série C_s - R_s)	74
2.6.1.2. Condensateur dans la représentation parallèle (circuit parallèle C_p - R_p)	75
2.6.1.3. Coefficient de qualité d'une bobine représentée par un circuit série (L_s - R_s)	75
2.6.1.4. Coefficient de qualité d'une bobine représentée par un circuit parallèle (L_p - R_p)	75
2.6.2. Cas des très basses fréquences (0 à 10 Hz)	76
2.6.2.1. Première mesure	76
2.6.2.2. Deuxième mesure	76
2.6.2.3. Troisième mesure	77
2.6.2.4. Résultat	78
2.6.3. Cas des basses fréquences et des radiofréquences (10^3 à 10^7 Hz)	78
2.6.3.1. Pont de Sauty : cas des condensateurs (presque) parfaits : $D = \tan \delta = 0$	78
2.6.3.2. Pont de Wien : cas des condensateurs à faibles pertes : $\tan \delta < 0,1$	79
2.6.3.3. Pont de Nernst : cas des condensateurs à pertes en général plus importantes : $0 \leq \tan \delta \leq 1$	79
2.6.3.4. Remarque	80
2.6.4. Cas des radiofréquences et ondes courtes (10^3 à 10^8 Hz)	80
2.6.4.1. Rappel	81
2.6.4.2. Principe de fonctionnement	81
2.6.5. Cas des fréquences supérieures	82
2.6.5.1. Domaine 10^8 à 10^9 Hz : utilisation des lignes de transmission	82
2.6.5.2. Domaine 10^9 à 3×10^{11} Hz : utilisation des techniques micro-ondes	82
2.6.5.3. Domaine de fréquences supérieures à 10^{12} Hz : techniques spectroscopiques	83
2.7. Détermination pratique des paramètres diélectriques pour des fréquences inférieures à 10^8 Hz (domaine classique d'étude des diélectriques)	84
2.7.1. Forme des condensateurs	84
2.7.2. Etude des connexions et de l'effet des capacités des fils de liaison	84
2.7.2.1. Mesure avec un des deux fils de connexion à la masse	84
2.7.2.2. Mesure avec les deux fils de connexion « flottants » par rapport à la masse	84

2.7.3. Détermination des formules utilisées pour calculer ϵ' et ϵ''	85
2.7.3.1. Cas où le diélectrique est représenté par un circuit parallèle (pont de Nernst)	85
2.7.3.2. Cas où le diélectrique est représenté par un circuit série (pont de Wien)	86
2.7.3.3. Cas du Q-mètre	87
2.8. Exercices	88

Chapitre 3. Spectroscopie des diélectriques ;

relations de Kramers-Krönig	95
3.1. Introduction : réponse diélectrique et conductivité continue (de conductivité)	95
3.1.1. Les différentes composantes de la réponse diélectrique ; rappels	95
3.1.2. Influence de la présence de charges « pseudo-libres » sur le comportement électrique	96
3.1.3. Séparation de la réponse diélectrique de la conductivité continue	97
3.2. Conductivité complexe	98
3.2.1. Expressions générales des composantes réelle et imaginaire de la conductivité	98
3.2.1.1. Equivalence entre densité de courant interne et densité de courant de polarisation	98
3.2.1.2. Rappel : densité de courant total dans un diélectrique sans pertes ($\epsilon_r = \epsilon_i$), placé entre électrodes métalliques	98
3.2.1.3. Densité de courant total dans un diélectrique avec pertes diélectriques (permittivité relative : ϵ_r)	99
3.2.2. Etude de la conductivité d'un diélectrique due à la présence de charges libres résiduelles ou de charges liées	101
3.2.2.1. Cas d'un diélectrique avec uniquement des charges libres résiduelles	101
3.2.2.2. Cas d'un diélectrique avec des charges libres résiduelles et des charges liées	103
3.2.2.3. Discrimination pratique de l'influence de la conductivité due à des charges libres sur les pertes diélectriques d'origine dipolaire (charges liées de façon plus générale)	104
3.3. Etude théorique de la fonction diélectrique ; fonction de relaxation. Les relations de Kramers-Krönig et leur utilisation	106
3.3.1. Rappel préliminaire	106
3.3.2. Réponse impulsionnelle et fonction de relaxation	107
3.3.3. Introduction de l'expression générale de la réponse à un signal	109

3.3.4. Relation entre les permittivités diélectriques et la fonction de relaxation	111
3.3.5. Formules de Kramers-Krönig	112
3.3.6. Application aux processus « relaxationnels » de type Debye	114
3.3.6.1. Forme de la fonction $Y(\omega)$ pour un processus de Debye	114
3.3.6.2. Cas de plusieurs domaines Debye superposés	115
3.3.7. Généralisation des relations de Kramers-Krönig	116
3.3.7.1. Extension aux mécanismes de polarisation induits	116
3.3.7.2. Extension à d'autres phénomènes électromagnétiques	118
3.3.8. Utilisation des relations de Kramers-Krönig	118
3.3.8.1. Détermination de Y ou de ϵ'' à partir de la connaissance de ϵ'' sur tout le spectre	118
3.3.8.2. Dispersion diélectrique ; discrimination des effets d'absorption diélectrique et de conduction électrique	118
3.4. Polarisation totale des diélectriques. Caractéristiques classiques du spectre des diélectriques. Introduction à la spectroscopie	120
3.4.1. Polarisation électronique ; relation entre la pulsation de résonance électronique et le gap d'un isolant	120
3.4.1.1. Polarisation électronique associée à différents types d'électrons	120
3.4.1.2. Relation entre la permittivité statique $\epsilon_r'(0)$ et le gap E_G d'un isolant	121
3.4.2. Polarisation ionique	124
3.4.3. Polarisation résultante dans un isolant	125
3.4.4. Le spectre diélectrique résultant	126
3.4.5. Coefficient d'absorption optique et pic d'absorption	127
3.5. Exercices	129
3.5.1. Exercice 1	129
3.5.2. Exercice 2	133
3.5.3. Exercice 3	135

Chapitre 4. Ondes EM dans les milieux matériels de dimension limitée

A : réflexion et réfraction, milieux absorbants	141
4.1. Introduction	141
4.2. Lois de la réflexion et de la réfraction à l'interface de deux milieux matériels	142
4.2.1. Représentation du système	142
4.2.2. Conservation de la pulsation à la réflexion ou à la transmission dans les milieux linéaires	143
4.2.2.1. Raisonnement physique	143
4.2.2.2. Raisonnement à l'aide des relations de continuité	144

4.2.3. Forme des vecteurs d'onde liée à la symétrie des milieux	144
4.2.3.1. Raisonnement physique lié à la configuration géométrique (symétrie) du système	144
4.2.3.2. Raisonnement mathématique : utilisation de la relation de continuité.	145
4.2.4. Forme des champs liée aux propriétés linéaires et à la symétrie des milieux.	146
4.2.4.1. Dans le milieu (1)	146
4.2.4.2. Dans le milieu (2)	147
4.2.5. Lois de Snell-Descartes dans le cas simple où les milieux (1) et (2) sont non absorbants : k_1 et k_2 réels.	147
4.2.5.1. Les vecteurs d'onde associés aux ondes incidentes, réfléchies et transmises sont tous dans le même plan (plan d'incidence)	147
4.2.5.2. Loi à la réflexion : $\theta_i = \theta_r$	147
4.2.5.3. Loi à la réfraction : $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_t$	148
4.2.6. Expression du champ électrique dans le milieu 1 ; lois de la réflexion	148
4.2.7. Lois de Snell-Descartes pour la réfraction dans le cas où le milieu (2) peut être absorbant : n_2 complexe tout comme k_2 (milieu 1 non absorbant : n_1 réel tout comme k_1)	151
4.2.7.1. Forme du champ dans le milieu (2)	151
4.2.7.2. Forme du vecteur d'onde dans le milieu (2)	152
4.2.7.3. Première loi de la réfraction	154
4.2.7.4. Deuxième loi de la réfraction.	154
4.3. Coefficients de réflexion et de transmission d'une OEMPPM à l'interface de deux milieux diélectriques l_{hi} non absorbants (n_1 et n_2 réels). Relations de Fresnel	159
4.3.1. Hypothèses et finalité de l'étude	159
4.3.2. Relations de Fresnel en polarisation perpendiculaire (TE).	160
4.3.2.1. Cas où k_t est réel ($n_2 > n_1$ ou $n_2 < n_1$ et $\theta_i < \theta_t$)	160
4.3.2.2. Cas où k_t est complexe ($n_2 < n_1$ et $\theta_i > \theta_t$) : l'onde est inhomogène et correspond à la figure 4.6	164
4.3.3. Relations de Fresnel en polarisation parallèle (TM).	165
4.3.3.1. Cas où k_t est réel ($n_2 > n_1$ ou $n_2 < n_1$ et $\theta_i < \theta_t$)	165
4.3.3.2. Cas où k_t est complexe ($n_2 < n_1$ et $\theta_i > \theta_t$)	170
4.3.3.3. Remarque	171
4.3.4. Coefficients de réflexion et de transmission en énergie	172
4.3.4.1. Rappels : flux d'énergie à travers une surface	172
4.3.4.2. Expression des coefficients de réflexion R et de transmission T. Bilan énergétique.	174

4.3.4.3. Représentation du coefficient de réflexion en fonction de l'angle d'incidence	175
4.3.5. Réflexion totale et réflexion totale frustrée	177
4.4. Réflexion et absorption par un milieu absorbant	180
4.4.1. Coefficient de réflexion en incidence normale à l'interface entre un milieu non absorbant (indice n_1) et un milieu absorbant (n_2)	180
4.4.2. Réflexion et absorption à basse et haute fréquence par un conducteur. Propriétés optiques d'un métal	181
4.5. Réflexion sur une couche magnétique ; condition anti-écho. Etude d'une structure anti-radar : couche de Dallenbach	182
4.5.1. Réflexion sur une couche magnétique non conductrice ; condition anti-écho	182
4.5.1.1. Réflexion sur une couche magnétique	182
4.5.1.2. Condition anti-écho	184
4.5.2. Etude d'une structure anti-radar : couche de Dallenbach	185
4.5.2.1. Concept de furtivité	185
4.5.2.2. Condition (1) : condition anti-écho à l'interface air-couche diélectrique/magnétique	185
4.5.2.3. Condition (2) pour prévenir la réflexion totale sur le métal : atténuation et profondeur de pénétration de l'onde dans le revêtement	188
4.5.2.4. Conclusion	189
4.6. Exercices	190
4.6.1. Exercice 1	190
4.6.2. Exercice 2 : pénétration limitée des ondes hertziennes dans le milieu sous-marin	198

Chapitre 5. Ondes EM dans les milieux matériels de dimension limitée

B : réflexion totale et propagation guidée	205
5.1. Introduction	205
5.2. Etude d'une ligne coaxiale	207
5.2.1. Forme TEM des ondes dans un câble coaxial	207
5.2.1.1. Forme de $E_0(r)$	208
5.2.1.2. Forme de $\vec{B}$	209
5.2.2. Forme des potentiels, de l'intensité et de l'impédance caractéristique de la ligne	210
5.2.2.1. Forme du potentiel vecteur	210
5.2.2.2. Forme du potentiel scalaire	210
5.2.2.3. Forme de l'intensité	211
5.2.2.4. Impédance caractéristique Z_c de ligne	212
5.2.3. Puissance électrique transportée par l'onde électromagnétique	212

5.2.4. Cas où le conducteur de l'âme centrale est non parfait (résistance R). Longueur d'atténuation de la ligne	214
5.3. Etude préliminaire de la réflexion normale d'une OEMPPM polarisée rectilignement sur un conducteur parfait ; ondes stationnaires ; antennes.	215
5.3.1. Propriétés d'un conducteur parfait ; relations de continuité aux interfaces	215
5.3.2. Expression de l'onde stationnaire suite à la réflexion	216
5.3.3. Etude de la forme des densités surfaciques de charges et de courant sur le métal	218
5.3.3.1. La densité surfacique de charges est nulle	218
5.3.3.2. Forme de la densité surfacique de courant	218
5.3.3.3. Applications	220
5.4. Etude de la propagation guidée entre deux plans conducteurs ; extension à la propagation dans un guide de section rectangulaire	221
5.4.1. Forme de l'onde et équation de propagation entre deux plans conducteurs	221
5.4.2. Etude des ondes TEM (transverses électromagnétiques)	222
5.4.2.1. Forme du champ électrique (de $\underline{E}_m(z)$)	222
5.4.2.2. Forme du champ magnétique	224
5.4.2.3. Remarque : cas du guide à section rectangulaire	224
5.4.3. Etude des ondes transverses électriques (ondes TE)	225
5.4.3.1. Direction de polarisation du champ électrique	225
5.4.3.2. Solutions de l'équation de propagation	226
5.4.3.3. Modes propres de vibration	227
5.4.3.4. Forme de $\underline{B}$	229
5.4.3.5. Propagation de l'énergie	229
5.4.3.6. Vitesse de phase et vitesse de groupe	230
5.4.4. Généralisation de l'étude de la propagation des ondes TE à un guide de section rectangulaire. Origine physique de la forme des solutions pour le champ électrique	232
5.4.4.1. Généralisation à un guide de section rectangulaire de la solution pour une onde TE	232
5.4.4.2. Origine physique de la forme de solution d'onde TE ; onde TE_{m0} prise comme support dans notre raisonnement (onde polarisée selon Ox)	234
5.4.4.3. Représentations physiques	238
5.4.4.4. Champs multimodes	242
5.4.4.5. Remarque : modes TM	244
5.5. Guidage optique : principes généraux ; fonctionnement des fibres . . .	244
5.5.1. Principe	244
5.5.2. Condition de guidage	245

5.5.2.1. Condition sur i	245
5.5.2.2. Condition sur i' (angle d'acceptance) ; ouverture numérique	246
5.5.3. Elargissement des signaux	247
5.6. Etude des caractéristiques électromagnétiques d'un guide symétrique monomode	249
5.6.1. Forme générale des solutions	250
5.6.2. Etude des solutions dans la région (2) d'indice n	251
5.6.3. Etude des solutions dans les régions (1) et (3)	253
5.6.4. Expressions du champ magnétique	255
5.6.5. Utilisation des conditions aux limites : détermination des constantes	257
5.6.6. Equation modale	258
5.6.6.1. Mise en équation	258
5.6.6.2. Equation générale et solutions	260
5.6.6.3. Solution monomode	261
5.6.6.4. Solutions multimodes	261
5.6.6.5. Nombre de modes	265
5.6.6.6. Fréquence de coupure	265
5.6.7. Remarques : autres façons de procéder	266
5.6.7.1. Remarque 1 : analogie avec les solutions du puits de potentiel	266
5.6.7.2. Raisonnement basé sur les principes de l'optique	266
5.6.8. Distribution du champ ; parité des solutions	268
5.6.8.1. Dans la région (2)	269
5.6.8.2. Dans la région (1)	269
5.6.8.3. Dans la région (3)	270
5.6.8.4. Effet Goos-Hänchen	270
5.6.9. Caractéristiques des guides	270
5.6.9.1. Forme du signal en sortie de guide	270
5.6.9.2. Nature des pertes dans un guide	271
5.6.10. Exercice d'application	274
5.6.11. Solution	276
Index	279