
manuel de
physique

ÉLECTRO- MAGNÉTISME

Paul ROUX



ÉLECTROMAGNÉTISME

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES EXERCICES

Introduction

<i>Systèmes de Coordonnées et Analyse Vectorielle.....</i>	1
1. Repérages de position.....	1
1.1. Repérage cartésien.....	1
1.2. Repérages cylindrique et sphérique associés.....	1
1.3. Bases locales.....	2
2. Fonctions de point.....	4
2.1. Définitions.....	4
2.2. Circulations.....	5
2.3. Flux.....	6
3. Opérateurs différentiels.....	8
3.1. Gradients.....	8
3.2. Divergence.....	10
3.3. Rotationnel.....	12
3.4. Laplaciens.....	14
4. Théorèmes d'Analyse vectorielle.....	15
4.1. Cas de nullité.....	15
4.2. Propriétés de la dérivation.....	15
4.3. Théorèmes intégraux.....	16
4.4. Distribution de Dirac.....	18

Exercices de l'Introduction

1. Calcul de lignes de champ et de circulations.....	6
2. Calcul de flux.....	7
3. Calcul de gradient et application au calcul d'une circulation.....	9
4. Etude d'un champ vectoriel uniforme.....	9
5. Calcul d'une divergence.....	12
6. Calcul d'un rotationnel.....	13
7. Calcul du rotationnel d'un champ de vitesses.....	14
8. Application du théorème de Stokes.....	16
9. Application du théorème d'Ostrogradski.....	17

Chapitre Un

<i>Le champ électrostatique dans le vide.....</i>	21
1. Généralités.....	21
2. La loi de Coulomb.....	24
2.1. Le champ électrostatique.....	24
2.2. Les modélisations des charges.....	25
3. Les propriétés de symétrie du champ.....	28
3.1. Invariances de la distribution.....	28
3.2. Plans de symétrie de la distribution.....	30
4. Le théorème de Gauss.....	32
4.1. L'équation de Maxwell-Gauss.....	32
4.2. Le théorème de Gauss.....	34

Exercices du Chapitre Un

1. Champ créé par un doublet.....	24
2. Champ créé sur son axe par un disque plan uniformément chargé.....	26
3. Champ créé par un fil rectiligne infini uniformément chargé.....	27
4. Influence des symétries sur le champ électrostatique.....	29
5. Influence des invariances sur le champ électrostatique.....	30
6. Distribution de charges à symétrie sphérique.....	31
7. Distribution de charges à symétrie cylindrique.....	31
8. Champ créé par un plan épais chargé.....	33
9. Théorème de Gauss pour une charge ponctuelle.....	34
10. Champ créé par une sphère chargée en volume, avec cavité sphérique.....	35

Chapitre Deux**Conséquences de la loi de Coulomb..... 37**

1. Le potentiel scalaire électrostatique.....	37
1.1. Définition du potentiel.....	37
1.2. Relations entre le champ et le potentiel.....	39
1.3. Equation de Poisson.....	41
1.4. Extréma du potentiel.....	42
1.5. Relations de passage.....	43
2. Le dipôle électrique.....	44
2.1. Définition du système.....	44
2.2. Potentiel et champ créés à grande distance.....	45
3. L'analogie gravitationnelle.....	48

Exercices du Chapitre Deux

1. Potentiel créé par un disque plan uniformément chargé.....	38
2. Champ et potentiel créés par un cylindre long chargé en volume.....	40
3. Equation de Poisson et Potentiel de Yukawa.....	41
4. Moment dipolaire, potentiel et champ créés par une sphère de glissement.....	46
5. Champ gravitationnel créé par un ellipsoïde massif homogène.....	50

Chapitre Trois**Conducteurs en équilibre électrostatique..... 53**

1. Généralités.....	53
2. Propriétés de l'équilibre électrostatique des conducteurs.....	54
2.1. Propriétés élémentaires.....	54
2.2. Théorème de Coulomb.....	54
2.3. Théorèmes de superposition et d'unicité.....	56
3. Coefficients d'influence.....	60
3.1. Caractérisation d'un état d'équilibre.....	60
3.2. Coefficients d'influence.....	60
3.3. Propriétés de la matrice.....	62
4. Condensateurs.....	64
4.1. Définition.....	64
4.2. Capacité d'un condensateur.....	64

Exercices du Chapitre Trois

1. Sphère métallique seule dans l'espace.....	55
2. Cavité dans un conducteur creux.....	57
3. Image électrostatique d'une charge ponctuelle devant un plan équipotentiel.....	57
4. Sphère métallique dans un champ extérieur uniforme.....	58
5. Influence mutuelle de deux sphères métalliques placées à grande distance.....	61
6. Etude d'un condensateur plan.....	65
7. Etude d'un condensateur cylindrique.....	66
8. Etude d'un condensateur sphérique.....	67
9. Etude d'un condensateur diédrique.....	67

Chapitre Quatre

Forces électrostatiques et énergie électrostatique	69
1. Énergie électrostatique d'un système de charges	69
1.1. Définition	69
1.2. Détermination de l'énergie électrostatique d'un système de charges	70
1.3. Une charge agit-elle sur elle-même ?	73
1.4. Localisation de l'énergie électrostatique	74
2. Énergie des systèmes de conducteurs en équilibre	77
2.1. Expressions de l'énergie électrostatique	77
2.2. Déplacement d'un conducteur	80
2.3. Travail des forces électrostatiques	81
2.4. Cas des déplacements à potentiels constants	83
3. Pression électrostatique	85
3.1. Définition et calcul de la pression électrostatique	85
3.2. Lien avec le théorème de Coulomb	88
3.3. Calcul direct du torseur des forces électrostatiques	90

Exercices du Chapitre Quatre

1. Énergie d'une sphère uniformément chargée en volume	69
2. Constitution progressive d'une sphère uniformément chargée	70
3. Énergie et forces électrostatiques dans un condensateur plan	73
4. Énergie électrostatique d'une sphère de charge non uniforme	74
5. Calcul de l'énergie électrostatique d'un système de deux conducteurs	76
6. Calcul énergétique de la capacité d'un condensateur conique	77
7. Force entre armatures du condensateur plan (première méthode)	80
8. Couple entre armatures du condensateur diédrique (première méthode)	81
9. Force et couple entre armatures de condensateurs (deuxième méthode)	82
10. Pression électrostatique sur une moitié de sphère métallique seule	84
11. Force exercée sur une moitié de sphère équipotentielle dans un champ extérieur	85
12. Force électrostatique sur un conducteur à charge répartie en épaisseur	87
13. Calcul direct du couple entre armatures du condensateur diédrique	88

Chapitre Cinq

Forces magnétiques et dipôles passifs	93
1. Introduction	93
2. Force de Lorentz	94
2.1. Définition	94
2.2. Symétries positives du champ magnétique	95
2.3. Symétries négatives du champ magnétique	96
3. Descriptions du courant électrique	97
3.1. Définitions	97
3.2. Densité volumique de courant	97
3.3. Densité surfacique de courant	98
3.4. Courants filiformes	100
3.5. Expressions de la force de Lorentz	100
3.6. Conservation de la charge	101
3.7. Équation de continuité	102
4. Courants dans les conducteurs ohmiques	103
4.1. Loi d'Ohm	103
4.2. Charges dans les conducteurs	106
4.3. Champ de Hall	107
4.4. Force de Laplace	111
5. Dipôles passifs	112
5.1. Définitions	113
5.2. Efforts mécaniques subis par un dipôle passif	115
5.3. Énergie potentielle	117

Exercices du Chapitre Cinq

1. Courants surfacique et volumique en géométrie cylindrique	99
2. Courants radiaux dans une géométrie sphérique	101
3. Modèle à chocs statistiques pour la loi d'Ohm	104
4. Calcul de la résistance d'un conducteur cylindrique	104
5. Calcul de la résistance de fuite d'un condensateur cylindrique	105
6. Différence de potentiel de Hall	108
7. Magnétorésistance de Hall en géométrie cylindrique	109
8. Déterminations du moment magnétique d'une sphère tournante chargée	114
9. Oscillations d'un aimant permanent dans un champ magnétique uniforme	116
10. Positions relatives d'équilibre stable de deux dipôles rigides oscillants	117

Chapitre Six**Equations de base de la magnétostatique** 119

1. Introduction	119
2. La loi de Biot et Savart	119
2.1. Énoncé de la loi	119
2.2. Symétries du champ magnétique	124
2.3. Invariances du champ magnétique	126
3. Le potentiel vecteur magnétique	127
3.1. Conservation du flux magnétique	127
3.2. Le potentiel vecteur	130
3.3. Expressions du potentiel vecteur	133
4. Le théorème d'Ampère	135
4.1. L'équation de Maxwell-Ampère	135
4.2. Le théorème d'Ampère	137
4.3. Relations de passage	141

Exercices du Chapitre Six

1. Champ magnétique créé par un fil rectiligne infini parcouru par un courant	120
2. Champ magnétique créé par une spire plate sur son axe	122
3. Champ magnétique créé par une nappe plane de courants surfaciques	123
4. Influence des symétries sur la nature des lignes de champ magnétique	125
5. Influence des invariances sur le champ magnétique	126
6. Étude des bobines de Helmholtz	128
7. Potentiel vecteur d'un fil rectiligne infini	131
8. Potentiel vecteur d'une nappe plane de courants surfaciques	132
9. Potentiel vecteur d'une spire plane en un point de son axe	134
10. Champ magnétique créé par un fil rectiligne parcouru de courants volumiques	136
11. Champ magnétique créé par un fil rectiligne parcouru de courants surfaciques	137
12. Champ et potentiel vecteur créés par un solénoïde	138
13. Champ magnétique et densité surfacique de courant pour un tore bobiné	142

Chapitre Sept**Magnétostatique des circuits filiformes** 145

1. Dipôle magnétique actif	145
1.1. Définition	145
1.2. Potentiel vecteur créé à grande distance	146
1.3. Champ magnétique créé à grande distance	147
2. Travail et énergie potentielle des forces de Laplace	153
2.1. Travail des forces de Laplace	153
2.2. Flux coupé	153
2.3. Circuits fermés dans un champ permanent	154
3. Interaction de plusieurs circuits filiformes fermés	159
3.1. Définitions	159
3.2. Inductance propre, inductance mutuelle	160

4. Energie magnétostatique	164
4.1. Introduction	164
4.2. Energie d'un système de circuits	165
4.3. Densités volumiques d'énergie magnétique	166

Exercices du Chapitre Sept

1. Comparaison d'une spire plate et d'un dipôle actif	147
2. Champ et potentiel vecteur créé par une sphère chargée en rotation	148
3. Interaction entre un fil rectiligne et une spire rectangulaire	150
4. Application du théorème de Maxwell: calcul d'un flux coupé	154
5. Application d'une variation de flux à un calcul de force de Laplace	155
6. Spire plate tournant dans un solénoïde infini	156
7. Inductances propres et mutuelles de deux solénoïdes (méthodes directes)	161
8. Inductance propre d'une ligne électrique	163
9. Inductances propres et mutuelles de deux solénoïdes (méthode énergétique)	168
10. Inductance propre d'un câble coaxial	168

Chapitre Huit

Induction électromagnétique

1. Généralités	171
2. Le phénomène d'induction électromagnétique	172
2.1. Un exemple d'induction de Lorentz	172
2.2. Un exemple d'induction de Von Neumann	173
2.3. Loi de Lenz et champ électromoteur dans le cas de Lorentz	174
2.4. Loi de Lenz et champ électromoteur dans le cas de Von Neumann	178
2.5. Induction dans le cas général	179
3. Conséquences de la loi de Lenz	182
3.1. Lois locales de l'induction	182
3.2. Force électromotrice et courant induit	183
3.3. Courants de Foucault	185
3.4. Auto-induction	187
4. Transferts électromécaniques	190
4.1. Présentation générale	190
4.2. Couplage des équations électromécaniques	192
4.3. Transferts électromécaniques d'énergie	193

Exercices du Chapitre Huit

1. Force électromotrice induite dans une roue de Barlow	175
2. Spire tournant dans un champ magnétique uniforme et constant	177
3. Spire dans un champ magnétique uniforme et sinusoïdal	179
4. Spire tournant dans un champ tournant	180
5. Quantité d'électricité induite par le mouvement d'un aimant permanent	183
6. Principe d'un fluxmètre à amplificateur opérationnel	184
7. Courants de Foucault dans un four à induction	185
8. Couple moteur exercé sur le rotor d'un moteur asynchrone	188
9. Circuits oscillants LC couplés par mutuelle inductance	189
10. Conditions de fonctionnement d'un moteur asynchrone	190
11. Roue de Barlow en tant que moteur et générateur	192
12. Bilan des puissances dans une roue de Barlow	193

Chapitre Neuf

Le système des équations de Maxwell

1. Généralités	195
2. Le système d'équations de Maxwell	196
2.1. Le premier groupe des équations de Maxwell	196
2.2. Le second groupe des équations de Maxwell	197
2.3. Cas des régimes statiques	203

3. Conséquences mathématiques des équations de Maxwell	204
3.1. Les potentiels.....	204
3.2. Conditions de Jauge.....	205
3.3. Equations de Poisson.....	206
3.4. Relations de passage.....	207
3.5. Surface libre d'un conducteur Ohmique.....	211
3.6. L'approximation des régimes quasi-permanents.....	213
4. L'énergie électromagnétique	215
4.1. Le vecteur de Poynting.....	215
4.2. Conservation de l'énergie électromagnétique.....	218
Exercices du Chapitre Neuf	
1. Etude d'un condensateur plan en régime sinusoïdal permanent.....	199
2. Effet de peau dans un conducteur Ohmique.....	201
3. Etude d'un câble coaxial en régime statique.....	203
4. Sphère supraconductrice dans un champ magnétique statique.....	209
5. Condensateur plan en régime variable.....	212
6. Vecteur de Poynting en régime permanent dans un câble coaxial.....	216
7. Vecteur de Poynting en régime permanent dans un conducteur Ohmique.....	216
8. Bilan de la charge d'un condensateur plan.....	217
9. Bilan du transfert de puissance du champ à la matière (géométrie cylindrique).....	219
10. Bilan du transfert de puissance du champ à la matière (géométrie sphérique).....	219

Chapitre Dix

Electricité dans les milieux matériels	223
1. Présentation.....	223
2. Polarisation des diélectriques.....	224
2.1. Permittivité relative et polarisation.....	224
2.2. Description quantitative de la polarisation.....	225
2.3. Equations de Maxwell dans les diélectriques en régime permanent.....	227
2.4. Relations de passage.....	229
3. Caractérisation des matériaux diélectriques.....	230
3.1. Nature des phénomènes de polarisation.....	230
3.2. Champ local et champ moyen.....	234
3.3. Relations constitutives linéaires.....	235
3.4. Réfraction des lignes de champ.....	240
4. Energie électrique dans les milieux polarisés.....	245
4.1. Energie électrostatique en présence d'un diélectrique.....	245
4.2. Cas des milieux linéaires isotropes.....	247
4.3. Calcul direct des forces exercées sur les diélectriques.....	250

Exercices du Chapitre Dix

1. Etude d'un condensateur plan avec diélectrique.....	226
2. Sphère uniformément polarisée.....	228
3. Parallélépipède uniformément polarisé creusé d'une cavité sphérique.....	229
4. Polarisabilité électronique dans le modèle de J. J. Thomson.....	231
5. Polarisation d'orientation dans le modèle de Langevin.....	232
6. Condensateur plan à deux diélectriques en série.....	236
7. Condensateur cylindrique à deux diélectriques en parallèle.....	238
8. Images diélectriques.....	241
9. Sphère diélectrique linéaire isotrope dans un champ extérieur uniforme.....	243
10. Condensateur cylindrique à diélectrique liquide (étude thermodynamique).....	247
11. Condensateur cylindrique à diélectrique liquide (étude mécanique).....	251

Chapitre Onze

Modèles microscopiques de polarisation	253
1. Résumé et Présentation	253
2. Susceptibilité diélectrique	254
2.1. Expression de Lorentz du champ local	254
2.2. Relation entre susceptibilité et polarisabilité	256
2.3. Etude expérimentale de la polarisabilité	257
2.4. Catastrophe de polarisation et ferroélectricité	258
3. Polarisation en régime variable	262
3.1. Polarisation électronique en régime variable	262
3.2. Comportement fréquentiel de la permittivité électronique	264
3.3. Autres modes de polarisation en régime variable	268
3.4. Courants de polarisation	268
Exercices du Chapitre Onze	
1. Champ local dans le modèle d'Onsager	255
2. Susceptibilité et polarisation dans le modèle d'Onsager	256
3. Polarisation de saturation du Titanate de Baryum	259
4. Etude thermodynamique de la transition ferroélectrique	260
5. Condition d'apparition de la ferroélectricité	261
6. Fréquence de résonance d'un diélectrique en fonction de la densité	265
7. Pertes diélectriques en régime variable (deux méthodes)	265
8. Pertes diélectriques en régime variable (troisième méthode)	269

Chapitre Douze

Magnétisme dans les milieux matériels	271
1. Présentation	271
2. Magnétisme dans les milieux matériels	272
2.1. Perméabilité magnétique	272
2.2. Magnétisation	273
2.3. Equations de Maxwell et relations de passage	279
3. Caractérisation des milieux magnétiques	283
3.1. Nature des phénomènes de magnétisation	284
3.2. Cas des milieux linéaires	285
3.3. Ferromagnétisme	290
4. Energie magnétique dans les milieux magnétiques	291
4.1. Energie magnétique en présence d'un milieu magnétique	291
4.2. Cas des milieux linéaires isotropes	292
4.3. Calcul direct des forces exercées sur un milieu magnétisé	292
Exercices du Chapitre Douze	
1. Champ magnétique d'un barreau cylindrique uniformément aimanté selon son axe	275
2. Champ magnétique d'une sphère uniformément aimantée	276
3. Relations de passage appliquées à un barreau et à une sphère uniformément aimantés	280
4. Champ magnétique d'un barreau cylindrique aimanté perpendiculairement à son axe	281
5. Rapport gyromagnétique orbital et magnéton de Bohr	284
6. Inductance propre d'un solénoïde avec noyau magnétique	286
7. Sphère M.M.M.L.H.I. dans un champ magnétique extérieur uniforme	287
8. Ascension d'un liquide paramagnétique dans l'entrefer d'un aimant	293

Chapitre Treize

Modèles microscopiques de Magnétisation	295
1. Paramagnétisme	295
1.1. Substances paramagnétiques	295
1.2. Paramagnétisme de spin	297
1.3. Comportement thermique des substances paramagnétiques	302

2. Diamagnétisme	309
2.1. Description qualitative.....	309
2.2. Susceptibilité diamagnétique.....	311
3. Ferromagnétisme	314
3.1. Présentation du ferromagnétisme.....	314
3.2. Interprétation microscopique du phénomène.....	317
3.3. Hystérésis ferromagnétique.....	318
3.4. Pertes d'énergie par hystérésis.....	321
Exercices du Chapitre Treize	
1. Calcul de Langevin de la susceptibilité paramagnétique.....	298
2. Calcul de Brillouin de la susceptibilité paramagnétique.....	300
3. Refroidissement d'un cristal paramagnétique par désaimantation adiabatique.....	304
4. Célérité du son dans un gaz parfait paramagnétique.....	306
5. Théorème de Larmor.....	309
6. Susceptibilité diamagnétique de l'atome d'Hydrogène en mécanique quantique.....	312
7. Moment magnétique atomique du Fer.....	317
8. Réalisation d'un aimant permanent.....	319
9. Pertes d'énergie dans un matériau ferromagnétique lors d'un cycle d'hystérésis.....	322