

Bernard GENDREAU

ÉLECTROMAGNÉTISME STATIQUE DANS LE VIDE

L'essentiel du cours
+ 150 exercices corrigés



SOMMAIRE DU COURS

CHAPITRE I. CHAMP ÉLECTROSTATIQUE CRÉÉ PAR UNE DISTRIBUTION DE CHARGES STATIQUES.....	13
I.1. Propriétés des corps électrisés. Charge électrique	13
I.2. Interaction électrostatique entre deux charges ponctuelles : loi de Coulomb	13
I.3. Champ électrostatique	14
I.4. Topographie du champ électrostatique : ligne de champ électrostatique	15
I.5. Invariances et symétries	15
 CHAPITRE II. PROPRIETES FONDAMENTALES DU CHAMP ÉLECTROSTATIQUE : FLUX DU CHAMP (THÉORÈME DE GAUSS), CIRCULATION DU CHAMP. POTENTIEL ÉLECTROSTATIQUE.....	 17
II.1. Première propriété fondamentale du champ : le théorème de GAUSS	17
II.2. Deuxième propriété fondamentale du champ : circulation du champ électrostatique	17
II.3. Potentiel électrostatique	18
II.4. Relation entre champ et potentiel : le champ électrostatique dérive d'un potentiel électrique	19
II.5. Surfaces équipotentiellles et lignes de champ électrostatique	19
II.6. Relations de passage du champ électrostatique à la traversée d'une distribution surfacique	20
 CHAPITRE III. DIPÔLE ÉLECTROSTATIQUE.....	 23
III.1. Définitions	23
III.2. Potentiel et champ créés à grande distance	23
III.3. Lignes de champ. Comparaison avec les lignes de champ d'un doublet	24
 CHAPITRE IV. ÉQUILIBRE ÉLECTROSTATIQUE D'UN CONDUCTEUR. CAPACITÉ D'UN CONDENSATEUR.....	 27
IV.1. Conducteurs et isolants	27
IV.2. Propriétés d'un conducteur en équilibre électrostatique	27
IV.3. Champ électrostatique au voisinage de la surface d'un conducteur en équilibre électrostatique (théorème de Coulomb)	28
IV.4. Pression électrostatique	28
IV.5. Équilibre électrostatique d'un système de deux conducteurs	28
IV.6. Condensateur	29

CHAPITRE V. FORCE ET ÉNERGIE ÉLECTROSTATIQUES.....	31
V.1. Force électrostatique	31
V.2. Énergie potentielle électrostatique d'une charge ponctuelle q portée au potentiel V	31
V.3. Énergie potentielle d'interaction d'un système de charges ponctuelles	31
V.4. Énergie électrostatique	32
V.5. Énergie d'un condensateur	32
V.6. Application au dipôle électrostatique	32
CHAPITRE VI. ÉQUATIONS LOCALES DE L'ÉLECTROSTATIQUE.....	35
VI.1. Formes intégrale et différentielle (locale) du théorème de Gauss	35
VI.2. Formes intégrale et différentielle (locale) de la propriété de la circulation du champ	35
VI.3. Équation de Poisson	36
VI.4. Opérateurs gradient, divergence, rotationnel et laplacien	36
CHAPITRE VII. COURANT ÉLECTRIQUE.....	39
VII.1. Intensité du courant. Densité de courant	39
VII.2. Équation de conservation de la charge. Loi des nœuds	40
VII.3. Loi d'Ohm des milieux conducteurs	41
VII.4. Puissance électrique	43
CHAPITRE VIII. LOI DE BIOT ET SAVART. PROPRIÉTÉS FONDAMENTALES DU CHAMP MAGNÉTIQUE : CIRCULATION DU CHAMP (THÉORÈME D'AMPÈRE), FLUX DU CHAMP.....	45
VIII.1. Champ créé par un courant filiforme : loi de Biot et Savart	45
VIII.2. Invariances et symétries. Topographie du champ	47
VIII.3. Les deux propriétés fondamentales du champ : circulation et flux	48
VIII.4. Continuité et discontinuité du champ magnétique	49
CHAPITRE IX. DIPÔLE MAGNÉTIQUE.....	51
IX.1. Définitions	51
IX.2. Champ créé par un dipôle magnétique. Comparaison avec le dipôle électrostatique	51
IX.3. Lignes de champ d'un dipôle magnétique. Comparaison avec les lignes de champ d'une spire	52
CHAPITRE X. CHAMP ÉLECTROMAGNÉTIQUE. FORCE DE LORENTZ	53
X.1. Interaction électromagnétique. Force de Lorentz	53
X.2. Champ électromagnétique et référentiel	53
X.3. Puissance des forces électromagnétiques	54

CHAPITRE XI. EFFET HALL. FORCE DE LAPLACE.....	55
XI.1. Effet Hall	55
XI.2. Force de Laplace	58
CHAPITRE XII. TRAVAIL DES FORCES DE LAPLACE AGISSANT SUR UN CIRCUIT INDÉFORMABLE. ÉNERGIE D'UN DIPÔLE. ACTION D'UN CHAMP NON UNIFORME.....	59
XII.1. Travail des forces de Laplace. Actions des forces de Laplace	59
XII.2. Application au dipôle magnétique	60
CHAPITRE XIII. ÉNERGIE MAGNÉTIQUE DES CIRCUITS. INDUCTANCE PROPRE D'UN CIRCUIT. INDUCTANCE MUTUELLE DE DEUX CIRCUITS FILIFORMES.....	63
XIII.1. Énergie magnétique	63
XIII.2. Inductance propre d'un circuit filiforme	63
XIII.3. Énergie magnétique, inductance mutuelle de deux circuits filiformes	64
CHAPITRE XIV. ÉQUATIONS LOCALES DE LA MAGNÉTOSTATIQUE. ÉQUATIONS DE MAXWELL DE L'ÉLECTROMAGNÉTISME.....	67
XIV.1. Conservation de la charge en régime stationnaire	67
XIV.2. Formes locales des propriétés fondamentales du champ	67
XIV.3. Potentiel vecteur. Équation de Poisson	68
XIV.4. Les équations de Maxwell de l'électromagnétisme stationnaire	70
XIV.5 Les expressions analytiques des opérateurs	71

SOMMAIRE DES EXERCICES

EXERCICES DU CHAPITRE I	73
E1.1. Force d'interaction gravitationnelle et force d'interaction électrostatique	73
E1.2. Ionisation d'un bloc de cuivre	73
E1.3. Symétries, antisymétries et orientation du champ (I)	74
E1.4. Symétries, antisymétries et orientation du champ (II)	74
E1.5. Symétries et orientation du champ électrostatique. Invariances et expression du champ électrostatique (I)	76
E1.6. Symétries et orientation du champ électrostatique. Invariances et expression du champ électrostatique (II)	76
E1.7. Champ créé par une distribution de charge rectiligne uniforme finie	77
E1.8. Champ créé par une distribution circulaire de densité linéique uniforme	79
E1.9. Champ hyperstationnaire	81
EXERCICES DU CHAPITRE II	83
E2.1. Potentiel créé par une distribution circulaire de densité linéique uniforme	83
E2.2. Potentiel et champ électrostatique créé par une distribution surfacique circulaire	84
E2.3. Champ créé par une distribution surfacique cylindrique uniforme	86
E2.4. Champ créé par une distribution volumique cylindrique	88
E2.5. Potentiel et champ créés par une distribution surfacique demi-sphérique	89
E2.6. Potentiel et champ créés par une distribution volumique demi-sphérique	90
E2.7. Potentiel et champ créés par une distribution sphérique surfacique non uniforme	90
E2.8. Champ et potentiel créés par une distribution surfacique tronconique non uniforme	92
E2.9. Champ et potentiel créés par une distribution volumique cylindrique de grande longueur	93
E2.10. Champ créé par une distribution rectiligne filiforme, infinie et uniforme	94
E2.11. Champ et potentiel créés par une distribution surfacique cylindrique uniforme (nappe de faible épaisseur), de grande longueur	95
E2.12. Champ et potentiel créés par une distribution volumique sphérique uniforme	96
E2.13. Champ et potentiel créés par une distribution surfacique sphérique uniforme de faible épaisseur	98
E2.14. Champ et potentiel créés par une distribution sphérique non uniforme	99
E2.15. Modèle de J.J. Thomson de l'atome d'hydrogène (1905)	100
E2.16. Champ créé au voisinage d'une nappe plane d'épaisseur négligeable	101
E2.17. Champ et potentiel créés au voisinage d'une distribution uniforme plane	102
E2.18. Modèle de Yukawa de l'atome d'hydrogène	104
E2.19. Champ créé par deux distributions rectilignes de charge, infinies et uniformes	105
E2.20. Champ et potentiel créés par une distribution sphérique non uniforme	106
E2.21. Champ créé au voisinage de l'axe d'une distribution circulaire	108
E2.22. Champ électrique au voisinage de la surface de la Terre	109
EXERCICES DU CHAPITRE III	111
E3.1. Carte du champ créé par un dipôle	111
E3.2. Moment dipolaire de la molécule d'eau	113

E3.3. Moment dipolaire de la molécule de chlorure d'hydrogène	114
E3.4. Potentiel créé par trois charges ponctuelles (distribution quadripolaire)	115
E3.5. Champ créé par une distribution de charges équivalente à un dipôle	115
E3.6. Distribution surfacique cylindrique non uniforme, de grande longueur	117
E3.7. Distributions sphériques homogènes. Dipôle équivalent	119
E3.8. Moment dipolaire induit de l'atome d'hydrogène	122
E3.9. Force de Van der Waals	122

EXERCICES DU CHAPITRE IV 125

E4.1. Pression électrostatique	125
E4.2. Condensateur plan idéal	126
E4.3. Condensateur cylindrique. Câble coaxial	127
E4.4. Sphère conductrice homogène portée à un potentiel donné	128
E4.5. Condensateur sphérique	129
E4.6. Conducteurs sphériques	130
E4.7. Introduction d'une plaque entre les armatures d'un condensateur plan	132
E4.8. Sphère conductrice placée dans un champ électrique uniforme	134

EXERCICES DU CHAPITRE V 137

E5.1. Oscillations d'une charge ponctuelle	137
E5.2. Modèle de Bohr de l'atome d'hydrogène (1910)	139
E5.3. Énergie d'interaction de deux particules	140
E5.4. Énergie du cristal de chlorure de sodium	141
E5.5. Énergie d'un condensateur	142
E5.6. Confinement de l'énergie	143
E5.7. Force subie par une demi-sphère conductrice portée à un potentiel donné	143
E5.8. Énergie d'un conducteur seul	144
E5.9. Énergie d'une distribution volumique sphérique uniforme	145
E5.10. Application 1 : calcul du rayon classique de l'électron	146
E5.11. Application 2 : calcul du rayon d'un noyau atomique	147
E5.12. Introduction réversible, à charge constante, d'un disque métallique entre les armatures d'un condensateur plan	148
E5.13. Évolution libre, à charge constante puis à potentiel constant, d'une des armatures d'un condensateur plan	149
E5.14. Déplacement à vitesse constante, à charge constante puis à potentiel constant, d'une des armatures d'un condensateur plan	151
E5.15. Déplacements réversible et irréversible, à potentiel constant, d'une des armatures d'un condensateur plan	152
E5.16. Petites oscillations d'une armature d'un condensateur plan	154
E5.17. Modèles de J.J. Thomson et de N. Bohr de l'atome d'hydrogène	155

EXERCICES DU CHAPITRE VI 157

E6.1. Champ dérivant d'un potentiel	157
E6.2. Champ et potentiel créés par une distribution cylindrique	157
E6.3. Champ et potentiel créés par une distribution sphérique	158
E6.4. Champ et potentiel créés au voisinage d'une distribution plane	159
E6.5. Capacité d'un condensateur diédrique	159
E6.6. Distribution surfacique cylindrique	160
E6.7. Distribution surfacique sphérique	162
E6.8. Modélisation d'une jonction	163
E6.9. Agrégation des colloïdes	165

EXERCICES DU CHAPITRE VII	169
E7.1. Vitesse d'ensemble des électrons dans un fil de cuivre	169
E7.2. Mobilité et champ électrique dans un conducteur	169
E7.3. Étude sommaire de la conduction	170
E7.4. Électrolyse d'une solution d'acide chlorhydrique	171
E7.5. Conductivité d'une solution de chlorure de baryum	171
E7.6. Conductivité d'un semi-conducteur	172
E7.7. Résistivité d'un échantillon de cristal dopé	173
EXERCICES DU CHAPITRE VIII	175
Topographie du champ magnétique créé par quelques distributions de courant « classiques »	
E8.1. Topographie du champ magnétique créé par un fil rectiligne illimité	175
E8.2. Topographie du champ magnétique créé par une spire circulaire	176
E8.3. Topographie du champ magnétique créé par un solénoïde	177
E8.4. Topographie du champ magnétique créé par un solénoïde infini	178
Calculs de champs magnétiques créés par des distributions de courant rectilignes	
E8.5. Champ magnétique créé par une partie rectiligne de circuit	179
E8.6. Champ magnétique créé par une spire carrée	180
E8.7. Champ magnétique créé par un circuit filiforme rectiligne	181
E8.8. Champ magnétique créé par une spire polygonale	183
Calculs de champs magnétiques créés par des distributions de courant circulaires	
E8.9. Champ magnétique créé par une spire circulaire en un point de son axe	184
E8.10. Champ magnétique créé par une demi-spire circulaire	185
E8.11. Champ créé par une spire circulaire au voisinage du centre	187
E8.12. Champ magnétique créé par une spire circulaire au voisinage de l'axe	188
E8.13. Champ magnétique créé par un circuit particulier	189
E8.14. Champ magnétique créé au centre d'une plaque de cuisson	189
E8.15. Bobines de Helmholtz. Champ hyperstationnaire	190
Calculs de champs magnétiques créés par des solénoïdes	
E8.16. Champ magnétique créé en un point de l'axe d'un solénoïde	193
E8.17. Champ magnétique créé au centre d'un solénoïde épais	195
E8.18. Champ créé au centre d'un solénoïde à spires non jointives	196
E8.19. Champ magnétique créé par un solénoïde infini	198
E8.20. Champ magnétique créé par un enroulement torique	199
Champs créés par des courants volumiques et surfaciques	
E8.21. Champ magnétique créé par une distribution volumique axiale (I)	201
E8.22. Champ magnétique créé par une distribution volumique axiale (II)	202
E8.23. Champ magnétique créé par une distribution surfacique cylindrique	203
E8.24. Champ magnétique créé par une distribution volumique orthoradiale	203
E8.25. Champ magnétique créé par une distribution surfacique orthoradiale	205
E8.26. Champ magnétique créé par une distribution volumique plane	206
E8.27. Champ magnétique créé par une distribution surfacique plane	207
E8.28. Champ magnétique créé par un disque chargé en rotation uniforme	208
E8.29. Champ magnétique au centre d'une sphère en rotation uniforme	209
E8.30. Champ magnétique dans un câble coaxial	210
E8.31. Champ magnétique créé par un solénoïde à enroulement hélicoïdal	210

EXERCICES DU CHAPITRE IX	213
E9.1. Champ magnétique terrestre	213
E9.2. Flux du champ magnétique créé par un dipôle	214
E9.3. Champ créé par une spire circulaire en des points éloignés	214
E9.4. Moment magnétique d'une sphère en rotation uniforme	216
EXERCICES DES CHAPITRES X ET XI	217
E11.1. Définition de l'Ampère	217
E11.2. Équilibre d'un cadre dans un champ magnétique	217
E11.3. Équilibre d'une tige dans un champ magnétique	219
E11.4. Roue de Barlow	220
E11.5. Action subie par une petite spire placée dans un champ magnétique	222
E11.6. Action d'un dipôle sur une spire circulaire	223
E11.7. Principe du moteur à courant continu	224
E11.8. Haut-parleur	225
E11.9. Barre en rotation uniforme	226
E11.10. Mouvement d'une particule dans un champ uniforme et constant	227
E11.11. Effet Hall	230
EXERCICES DU CHAPITRE XII	233
E12.1. Actions subies par un dipôle placé dans un champ magnétique uniforme	233
E12.2. Actions subies par un dipôle placé dans un champ magnétique uniforme (II)	234
E12.3. Rotation d'un dipôle placé dans un champ magnétique uniforme	235
E12.4. Action subie par une petite spire (dipôle) placée dans un champ magnétique non uniforme	235
E12.5. Action d'un dipôle sur une spire circulaire	237
E12.6. Atome d'hydrogène. Rapport gyromagnétique. Pulsation de Larmor	237
E12.7. Interaction de deux dipôles identiques	239
E12.8. Électrodynamomètre de Pellat	240
EXERCICES DU CHAPITRE XIII	241
E13.1. Énergie emmagasinée par un solénoïde infini. Inductance propre	241
E13.2. Inductance propre d'un câble coaxial	241
E13.3. Énergie d'interaction de deux circuits filiformes. Inductance mutuelle	242
E13.4. Coefficient de couplage de deux circuits filiformes	244
EXERCICES DU CHAPITRE XIV	245
E14.1. Potentiel vecteur créé par une spire circulaire en un point de son axe	245
E14.2. Champ magnétique et potentiel vecteur créés par une distribution plane	245
E14.3. Champ magnétique et potentiel vecteur créés par une distribution axiale	247
E14.4. Potentiel vecteur créé par un solénoïde infini	250
E14.5. Champ magnétique créé par une spire circulaire au voisinage de l'axe.	251
E14.6. Pression magnétique	252
E14.7. Confinement magnétique d'un plasma	254